

# **Bewertung der Verschleißbeständigkeit von befahrbaren Oberflächenschutzsystemen unter realitätsnahen Prüfbedingungen**

Vom Fachbereich  
Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

**DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. Eva-Maria Christina Ladner**

aus Fußgönheim

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. H. Sadegh-Azar
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. W. Breit
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Raupach
3. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. U. Wiens
Tag der mündlichen Prüfung:	25.05.2021

Kaiserslautern 2021  
(D 386)









Eva-Maria Christina Ladner

**Bewertung der Verschleißbeständigkeit von  
befahrbaren Oberflächenschutzsystemen unter  
realitätsnahen Prüfbedingungen**



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2013 bis 2018, in denen ich als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen (FWB) der Technischen Universität Kaiserslautern tätig war. Die Thematik der Arbeit ergab sich aus Forschungsvorhaben, die durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung sowie dem Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), gefördert wurden. An dieser Stelle möchte ich für die finanzielle Unterstützung der Forschungsvorhaben und den daran beteiligten Unternehmen danken. Besonders freut es mich, dass die gewonnenen Ergebnisse aus den durchgeführten Forschungsvorhaben in einem WIPANO (Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen)-Projekt beim Projektträger Jülich gemündet sind, an dem sich alle am Bau beteiligten Kreise vertreten sind. Hierdurch ist es nun möglich die Regelungslücke für befahrene Oberflächenschutzsysteme final zu schließen. Den Kollegen wünsche ich hierbei viel Erfolg!

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit für die Möglichkeit der Durchführung meiner wissenschaftlichen Tätigkeiten, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die vielen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Bedanken möchte ich mich auch für die Möglichkeiten der Präsentation der Ergebnisse auf zahlreichen Tagungen und Konferenzen sowie die Möglichkeit der Mitarbeit in Normenausschüssen und Gremien, wodurch ich wertvolle Kontakte in die Praxis knüpfen konnte.

Danken möchte ich ebenfalls Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach und Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens für die Übernahme des zweiten und dritten Berichterstatters. Ihre Expertise und Kollegialität durfte ich sowohl in den Normenausschüssen und Gremien als auch auf Tagungen und im Rahmen der Forschungstätigkeiten kennen lernen und weiß diese zu schätzen.

Ein weiterer Dank geht an unsere Labormitarbeiter Karl Leidner und Andreas Spitzer, die mich beim Bau des Prüfstandes und der Probenherstellung tatkräftig unterstützt haben. Meine studentischen Hilfskräfte Jessica Klug, Janine Kochert, Peter Erhard und Marc Müller waren jederzeit bei der Durchführung der zahlreichen Versuche tatkräftig helfend zur Seite. Weitere zusätzliche Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten zum Thema Oberflächenschutzsysteme am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen lieferten wichtige Erkenntnisse. Auch ohne diese Unterstützung wäre diese Dissertation nicht möglich gewesen. Danke.

Danken möchte ich dem Team des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen, für die vielen gemeinsamen Stunden auch außerhalb der Universität. Danke, dass aus Kollegen Freunde wurden, die ich nicht mehr missen möchte. Besonders danken möchte ich meiner Zimmerkollegin Bianca Dornisch-Bund, mit der ich sieben Jahre ein Büro teilte und die immer ein offenes Ohr für wertvolle Diskussionen hatte.

Im Privaten standen mir meine Freunde sowie meine Eltern, Dr. Wolfgang und Elvira Ladner, mein Bruder Dr.-Ing. Tobias Ladner mit Familie sowie mein Lebensgefährte Thomas Schlohmann und Familie zur Seite. Danke für Euren Ausgleich!

Fußgönheim, Mai 2021

Eva-Maria Ladner

## **Inhalt**

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Inhalt</b>	<b>ii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation / Veranlassung	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Vorgehensweise	5
<b>2 Oberflächenschutzsysteme</b>	<b>9</b>
2.1 Allgemeines	9
2.2 Arten	9
2.3 Aufbau und Funktionsweise befahrbarer Oberflächenschutzsysteme	11
2.3.1 Allgemeines	11
2.3.2 Oberflächenschutzsystem 8	13
2.3.3 Oberflächenschutzsystem 11	14
2.3.4 Oberflächenschutzsystem 13	15
2.3.5 Oberflächenschutzsystem 10 bzw. 14	16
2.3.6 Gegenüberstellung der befahrbaren Beschichtungssysteme	17
2.4 Regelwerke	20
2.4.1 Allgemeines	20
2.4.2 Produktregeln	20
2.4.3 Prüfregeln	21
2.4.4 Anwendungsregeln	22
2.5 Parameter für die Verschleißbeständigkeit	25
2.5.1 Allgemeines	25
2.5.2 Chemischer Aufbau von Oberflächenschutzsystemen	25
2.5.2.1 Allgemeines	25
2.5.2.2 Polyurethan (PUR)	28
2.5.2.3 Epoxidharz (EP)	28
2.5.2.4 Polymethylmethacrylat (PMMA)	29
2.5.3 Materialbedingte Parameter	30
2.5.4 Nutzungsbedingte Parameter	33
<b>3 Tribologische Beanspruchung durch Verschleißprüfverfahren</b>	<b>38</b>

3.1	Allgemeines	38
3.2	Tribologische Wirkungsweise	39
3.2.1	Definition	39
3.2.2	Verschleiß	40
3.2.2.1	Allgemeines	40
3.2.2.2	Verschleißmechanismen	41
3.2.2.3	Verschleißarten	42
3.2.3	Reibung	42
3.3	Verschleißmodell	43
3.4	Tribologische Betrachtung des Lastfalls PKW auf Oberflächenschutzsystem	46
3.5	Drehend, rollende Prüfverfahren für Oberflächenschutzsysteme	47
3.5.1	Allgemeines	47
3.5.2	Taber-Abriebverfahren nach DIN EN ISO 5470-1	47
3.5.3	BCA-Verfahren nach DIN EN 13892-4	48
3.5.4	Verschleißwiderstand nach Böhme nach DIN EN 13892-3	49
3.5.5	Bottroper Rad	50
3.5.6	Verschleißsimulator für Straßenmarkierungsmaterialien nach DIN EN 13197	51
3.5.7	Driving Abrasion Test (DAT)	52
3.5.8	Vergleich und Bewertung der Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung	53
3.6	Stehend, rollende Prüfverfahren für Oberflächenschutzsysteme	59
3.6.1	Allgemeines	59
3.6.2	Stuttgarter-Prüfung nach DIN EN 660-1	59
3.6.3	RWA-Verfahren nach DIN EN 13892-5	60
3.6.4	Aachener-Ravelling-Tester (ARTe)	61
3.6.5	Bänziger Rad Sika Deutschland GmbH	62
3.6.6	Parking Abrasion Test (PAT)	64
3.6.7	Vergleich und Bewertung der Prüfverfahren mit einer stehenden, rollenden Beanspruchung	65
3.7	Zusammenfassung und Bewertung der Prüfverfahren	71
<b>4</b>	<b>Parking Abrasion Test</b>	<b>73</b>
4.1	Allgemeines	73
4.2	Aufbau Parking Abrasion Test	73
4.3	Herstellung der Betongrundkörper	74
4.4	Applikation der Oberflächenschutzsysteme	75
4.5	Durchführung der Verschleißversuche	77
<b>5</b>	<b>Messtechnik</b>	<b>79</b>

5.1	Allgemeines	79
5.2	Visuelle Begutachtung und Klassifikation in Verschleißklassen	79
5.3	Zerstörende Ermittlung der Verschleißstärke anhand von Bohrkernproben	83
5.4	Zerstörungsfreie magnetisch-induktive Schichtdickenmessung	85
5.4.1	Allgemeines	85
5.4.2	Auswertung / Beispiel	86
5.5	Zerstörungsfreie Schichtdickenmessung per 2D / 3D-Laserscanning	87
5.5.1	Allgemeines	87
5.5.2	Beispielhafte Auswertung	89
5.6	Bewertung der Messtechnik	95
<b>6</b>	<b>Evaluierung des Prüfstandes an marktüblichen</b>	
	<b>Oberflächenschutzsystemen</b>	<b>97</b>
6.1	Allgemeines	97
6.2	Korrelation BCA- / PAT-Verfahren	99
6.2.1	Allgemeines	99
6.2.2	Ergebnisse	99
6.2.3	Schlussfolgerung	101
6.3	Abgleich PAT-Verfahren / Bänziger Rad	103
6.3.1	Allgemeines	103
6.3.2	Ergebnisse	105
6.3.2.1	Temperaturversuche an einer Stahlplatte	105
6.3.2.2	Verschleißbeständigkeit am Oberflächenschutzsystem	106
6.3.3	Schlussfolgerung	106
6.4	Einfluss unterschiedlicher Reifengeometrien auf die Temperaturentwicklung (und das Verschleißverhalten)	107
6.4.1	Allgemeines	107
6.4.2	Ergebnisse	110
6.4.3	Schlussfolgerung	114
6.5	Einfluss der Deckversiegelung auf die Verschleißbeständigkeit	115
6.5.1	Allgemeines	115
6.5.2	Ergebnisse	115
6.5.3	Schlussfolgerung	119
6.6	Zugmodule nach DIN ISO 527-2	121
6.6.1	Allgemeines	121
6.6.2	Durchführung	121
6.6.3	Ergebnisse	123
6.6.4	Schlussfolgerung	128
6.7	Einfluss einer Wasserbeaufschlagung auf die Verschleißbeständigkeit	131
6.7.1	Allgemeines	131

6.7.2	Ergebnisse	132
6.7.3	Schlussfolgerung	135
6.8	Einfluss von Splitt auf die Verschleißbeständigkeit	139
6.8.1	Allgemeines	139
6.8.2	Ergebnisse	140
6.8.3	Schlussfolgerung	142
6.9	Shore-Härte nach DIN EN ISO 868	144
6.9.1	Allgemeines	144
6.9.2	Durchführung	144
6.9.3	Ergebnisse	145
6.9.4	Schlussfolgerung	151
6.10	Bestimmung der Haftzugfestigkeit vor und nach der Beanspruchung	153
6.10.1	Allgemeines	153
6.10.2	Durchführung	153
6.10.3	Ergebnisse	153
6.10.4	Schlussfolgerung	154
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>155</b>
7.1	Schlussfolgerungen für die Prüfungen von Oberflächenschutzsystemen mit dem Parking Abrasion Test	155
7.2	Schlussfolgerungen für die Kontrolle und Instandhaltung von Oberflächenschutzsystemen	157
7.3	Schlussfolgerungen für die weitere Produktentwicklung	158
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>160</b>
8.1	Zusammenfassung	160
8.2	Ausblick	162
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>
	<b>Liste der verwendeten Technischen Regelwerke</b>	<b>173</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>177</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>186</b>
	<b>Anhang A</b>	<b>192</b>
	<b>Anhang B</b>	<b>196</b>
	<b>Anhang C</b>	<b>198</b>

## *Inhalt*

---

<b>Anhang D</b>	<b>260</b>
<b>Anhang E</b>	<b>267</b>
<b>Anhang F</b>	<b>293</b>
<b>Anhang G</b>	<b>295</b>
<b>Anhang H</b>	<b>340</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>375</b>



## **Kurzfassung**

Parkbauten aus Stahlbeton sind v. a. in den Wintermonaten chloridhaltigen Wässern ausgesetzt. Dringen die Chloride über Risse bis zum Bewehrungsstahl vor, so kann dies Bewehrungskorrosion auslösen. Ebenfalls korrosionsauslösend kann CO<sub>2</sub> sein. Beides geht, sofern keine Schutzmaßnahmen getroffen werden, mit dem Verlust der Gebrauchstauglichkeit bis hin zur Gefährdung der Standsicherheit des Bauwerks einher. Eine mögliche Maßnahme zum Schutze des Bauwerks vor diesen korrosionsauslösenden Medien stellt der Oberflächenschutz mit polymeren Systemen dar. Aufgrund der Befahrung durch PKWs sind die Oberflächenschutzsysteme mechanischem Abrieb ausgesetzt, welchem sie nur eine gewisse Zeit widerstehen können. Der Nachweis der Verschleißbeständigkeit erfolgt normativ gegenwärtig mit Verfahren, die aus anderen Bereichen entliehen sind und die hier auftretenden Verschleißmechanismen nicht ansatzweise widerspiegeln.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit werden die verschiedenen Aufbauvarianten von Oberflächenschutzsystemen und deren Funktionsweise erörtert. Ebenfalls werden die normativen und nicht normativ geregelten Prüfverfahren hinsichtlich der wirkenden Verschleißmechanismen bewertet. Im anschließenden praktischen Teil werden die Entwicklung und Evaluierung der Tauglichkeit eines eigenen Prüfstandes vorgestellt. Zusätzlich erfolgt eine Abgrenzung des Prüfverfahrens zum BCA-Verfahren (normatives Prüfverfahren) und dem Bänziger Rad (Prüfstand der Sika Deutschland GmbH). Neben der Prüfung marktüblicher Beschichtungssysteme werden weitere Parameter hinsichtlich ihrer Verschleißbeständigkeit geprüft. Dazu zählen die umgebungsbedingten Einflüsse wie eine zusätzliche Wasserbeaufschlagung und Verunreinigungen der Oberfläche, die durch eine Splittbeaufschlagung dargestellt werden, sowie der produktspezifische Einfluss der Deckversiegelung. Es können sowohl Unterschiede zwischen als auch innerhalb eines Oberflächenschutzsystemes aufgezeigt werden. Neben der Durchführung der Verschleißversuche werden auch verschiedene Wege zur Dokumentation des Verschleißes entwickelt. Hiervon hervorzuheben ist die zerstörungsfreie Aufzeichnung des Verschleißes mittels eines 2D / 3D-Lasers. Weiterhin werden mechanische Werkstoffparameter ermittelt und deren Aussagekraft hinsichtlich einer Verschleißbeständigkeit bewertet.

Die Ergebnisse der vorgenannten Forschungsvorhaben mündeten in einen beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Förderschiene "WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen" beantragten und inzwischen bewilligten Normungsantrag mit dem Titel „Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen mit Hilfe des Parking Abrasion Test (PAT-Verfahren)“.

## **Abstract**

Reinforced concrete parking structures are exposed to chloride-containing waters, especially during the winter months. If the chlorides penetrate through cracks to the reinforcement steel, this can trigger reinforcement corrosion. Corrosion can also be induced by CO<sub>2</sub>. Both are accompanied by the loss of usability and the stability of the structure. To protect the building from these corrosion-inducing media it is a protective measure of the surface protection with polymeric systems. Due to the vehicle driving, the systems are mechanically abradable, which they can only withstand for a certain time. The evidence of wear resistance is normative with procedures that are borrowed from other areas and the wear mechanisms are not even remotely reflected.

In the theoretical part of this work the construction variants of surface protection systems and their functioning are discussed. The various normative and non-normatively controlled test methods are evaluated with regard to the effective wear mechanisms. In the following practical part, a test stand is built and the suitability of the test procedure is evaluated there. In addition, the test procedure is differentiated from the BCA procedure (normative test procedure) and the Bänziger wheel (test stand of Sika Deutschland GmbH). In addition to testing commercially available coating systems, other parameters are checked for their wear resistance. These include the environmental influences such as additional water and grit as well as the product-specific influence of the top seal. Differences between and within a surface protection system can be shown. In addition to carrying out the wear tests, various ways of documenting the wear are also being developed. Of particular note is the non-destructive recording of wear using a 2D / 3D laser. Furthermore, mechanical material parameters are determined and their informative value regarding wear resistance is evaluated.

The results of this work resulted in the positively assessed application for the preparation of a draft standard based on these experiments.

# **1 Einleitung**

## **1.1 Motivation / Veranlassung**

Die ersten Hoch- bzw. Großgaragen entstanden in Deutschland in den 1920er und 1930er Jahren in Leipzig, Halle und Berlin und bestanden anfänglich noch aus einzelnen abgetrennten Boxen mit gefliesten Böden. Die „Richtlinie für die Genehmigung von Großgaragen und die dabei zu beachtenden Gesichtspunkte“ wurde 1925, 22 Jahre nach dem ersten Patent für eine Hochgarage, veröffentlicht. Die meisten Parkbauten, i. d. R. aus Stahlbeton und optisch wenig ansprechend, wurden zwischen 1960 und 1980 errichtet [Reul - 2011].

Unabhängig von der gewählten Konstruktionsart werden die Fahrbahnen und Stellflächen in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Parkbauten der 1960er und 1970er Jahre verfügen nach heutigem Kenntnisstand jedoch über eine zu geringe Betondeckung. Dies, kombiniert mit Ausführungsmängeln und einer deutlich niedrigeren Betongüte als heute gefordert, führte sowohl zu oberflächennahen Rissen als auch zu Trennrissen im Bauwerk und in der Folge zu Korrosionsschäden, bis hin zur Gefährdung der Standsicherheit. Ab einer Rissbreite von 0,2 mm können Chloride, die vorwiegend in den Wintermonaten eingetragen werden, leicht in das Bauwerk bzw. das Stahlbetonbauteil eindringen und zu Schäden am Bewehrungsstahl führen [Becken u. vom Berg - 2008].

Sichtbar werden die Schäden an der Oberfläche durch Risse, Abplatzungen, Aussinterungen, Farbabbblätterungen und zunehmend unebene Fahr- und Gehflächen. An der Deckenunterseite führt dies ebenfalls zu Abplatzungen, was meist durch Herabfallen von Betonteilen sichtbar wird. Während zu Beginn nur die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt wird, kann aufgrund des Querschnittsverlusts der Bewehrung im weiteren Verlauf die Standsicherheit gefährdet sein [Gehlen u. Weydert - 2004].

Im Jahre 2005 wurden noch immer viele Parkbauten ohne Beschichtungssystem ausgeführt, die zudem auch nur über Betondeckungen von 30 mm (statt 40 bzw. 45 mm) verfügten [Raupach - 2005]. In 10 bis 15 Jahre alten Parkbauten, die ohne Beschichtungssystem und ohne rissvermeidende Bauweise errichtet wurden, sind i. d. R. Korrosionsschäden vorzufinden ([Jung et al. - 2005], [Blohm u. Schachtner - 2012]). Die meisten Schäden, die durch eingeschleppte Tausalze entstehen, sind dabei auf Planungsfehler zurückzuführen und können nur mit großem Aufwand und Kosten instandgesetzt werden [Schöppel - 2002]. Aufgrund lokaler Fehlstellen (Risse, undichte Arbeits- und Dehnfugen), Pfützenbildung (> 2 mm Wasserspiegel), sowie über Rampen ist ein Wassereintritt und somit auch ein Chlorideintrag möglich. Die Risse entstehen vorwiegend auf der Fahrbahnoberseite, wobei zwischen Trennrissen und oberflächennahen Rissen unterschieden werden muss. Es kann sich dabei um Biegerisse, Schubrisse, aber auch Risse längs der Bewehrung handeln. Neben einer zu geringen Betondeckung (sowohl durch planerische Mängel als auch durch mangelhafte Ausführung), ist der i. d. R. nur z. T. berücksichtigte Lastfall der Temperaturbeanspruchung maßgebend für zwangsbedingte Riss- und Korrosionsschäden. Aufgrund der

Temperaturbeanspruchung kann eine Selbstheilung der Risse in Parkbauten ausgeschlossen werden, da diese sich wieder öffnen.

Zusätzlich begünstigt wurden die Korrosionsschäden durch die kommunale Verkehrssicherungspflicht, die seit Mitte der 1980er Jahre vorsieht, dass auch alle Nebenstraßen schnee- und eisfrei gehalten werden müssen, was zu einem immensen Verbrauchsanstieg von Tausalzen führte. So wurden beispielsweise im Winter 2005 3,5 Millionen Tonnen Tausalz in Deutschland verwendet [Statistik-Portal - 2019]. Nicht unerhebliche Mengen davon wurden auch in Parkbauten eingeschleppt [Reul - 2011]. Es kann davon ausgegangen werden, dass pro Radkasten circa zehn Liter Wasser bzw. Salz-Schnee-Gemisch eingeschleppt werden. Während in einer Privatgarage dies einem Eintrag von 40 Litern pro Tag je Fahrzeug entspricht, vervielfacht sich die Menge des Salz-Schnee-Gemischs in einem öffentlich genutzten Parkbau ins Unkalkulierbare [Fingerloos - 2018].

Für mechanisch und chemisch stark belastete Betonbauteile bieten Oberflächenschutzsysteme eine Möglichkeit diese vor physikalischen, chemischen und mechanischen Einwirkungen zu schützen ([DAfStb - 2001], [ZTV - 2003]). Beschichtungen werden seit Anfang der 1960er Jahre mit einem nahezu unveränderten Regelaufbau appliziert [Bayer u. Ebeling - 2006]. Spätestens seit Mitte der 1980er Jahre ist der Begriff „Oberflächenschutzsystem“ aus dem Baubereich nicht mehr wegzudenken [Schwamborn u. Wolff - 2012]. Mit Einführung der ersten DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ wurden 1990 zum ersten Mal Anforderungen an Oberflächenschutzsysteme in einem Regelwerk festgelegt. Das Aufbringen von Beschichtungen zum Schutze der Stahlbetonbauteile gegen das Eindringen von Chloriden ist heute allgemein anerkannte Regel der Technik (aaRdT, [Wolff u. Raupach - 2008]), wenn es sich dabei um Maßnahmen nach dem DBV-Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ [DBV - 2010] handelt. Zur Sanierung von Parkbauten ist es heute gängige Praxis Oberflächenschutzsysteme aus Flüssigkunststoffen wie z. B. Polyurethane (PUR), Epoxidharze (EP) oder Polymethylmethacrylate (PMMA) einzusetzen [Roeske - 2004].

Durch die Befahrung der Beschichtungssysteme werden diese mechanisch beansprucht. Dabei werden sie nicht selten einer Überbelastung ausgesetzt. Aus den Beanspruchungen resultieren wiederum erhöhter Abrieb und Rissbildungen am bzw. im Beschichtungssystem. Am häufigsten treten die Verschleißbeanspruchungen vor Schranken, an Rampen und in Kurvenbereichen auf, da dort die Systeme, infolge der auftretenden Flieh-, Brems- und Anfahrkräfte, extremen Schub- und Scherkräften ausgesetzt sind (Abb. 1.1). Durchdrehende Antriebsräder verstärken den Verschleiß zusätzlich. Folglich entsteht lokal eine hohe Reibungshitze, die dazu führen kann, dass der Gummiabrieb an der Beschichtung haften bleibt. Diese Bereiche sind daher sehr wartungsintensiv ([Flohrer - 2004], [Bolz u. de Hessele - 2005], [Wehrle - 2006], [Wolff u. Raupach - 2008], [Fix - 2012], [Wolff u. Schwamborn - 2013], [Wolff u. Schwamborn - 2017]). Neben den mechanischen Beanspruchungen durch den Fahrverkehr werden vor allem die elastischen Beschichtungssysteme durch tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen hinsichtlich ihrer Rissüberbrückungsfähigkeit beansprucht [Krams - 2011].



Abb. 1.1: Schadensbilder an befahrbaren, polymeren Beschichtungen in der Praxis

Beschichtungssysteme sind nur für leichte Beanspruchungen aus dem luftbereiften PKW- und Fußgängerverkehr bemessen. Oberflächenschutzsysteme sind für eine maximale Frequentierung von lediglich 100 Fahrzeugen (PKWs) pro Tag bei OS 8-, OS 11- und OS 13-Systemen ausgelegt ([Bastert et al. - 2011], [Meyer - 2013], [DIN 18560-7]). Liegt die Nutzungsfrequenz höher, dann stoßen Beschichtungssysteme schnell an ihre Grenzen. Vor allem die rissüberbrückenden Beschichtungssysteme sind aufgrund der Elastizität verschleißanfälliger gegenüber starren Systemen. Bezogen auf die übliche Nutzungsdauer von Parkbauten müssen Oberflächenschutzsysteme regelmäßig erneuert werden. Über die genaue Lebensdauer von Oberflächenschutzsystemen kann keine generelle Aussage getroffen werden, da diese von vielen Faktoren abhängig ist. Lebensdauern von 5 bis 20 Jahren sind in der Praxis üblich ([Stenzel - 2010], [Bastert u. Kilz - 2013], [Bastert - 2014], [Bastert et al. - 2015]). Bei überbauten Tiefgaragen kann man jedoch von einer deutlich höheren Lebensdauer ausgehen ([Münchner Runde - 2010], [Schöppel u. Stenzel - 2012], [Münchner Runde - 2013], [Beer - 2018]). D. h. in Abhängigkeit von der Frequentierung (mechanischer Belastung), Freibewitterung (UV-Strahlung, Regenereignisse, Frost) und ggf. weiteren Faktoren müssen Beschichtungen im Laufe der Parkhaus-Nutzungsdauer zumindest in Teilbereichen mehrfach erneuert werden.

Weiterhin ist der nur begrenzt vorhandene Schutz der Stahlbetonkonstruktion vor Tausalzen im Zeitraum zwischen beginnendem Funktionsfähigkeitsverlust und der Erneuerung des Oberflächenschutzsystems als kritisch anzusehen [Schöppel u. Stenzel - 2012]. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks sind daher regelmäßige Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen notwendig. Hierdurch ist jedoch kein dauerhafter Verschluss der Risse bzw. Schutz der

Bewehrung möglich. Ungeklärt ist ebenfalls, ob und ab welchem Schädigungsgrad der Beschichtungssysteme die Dauerhaftigkeit der Stahlbetonkonstruktionen gefährdet ist. Untersuchungen am Bauwerk haben gezeigt, dass der Widerstand von Grundierungen gegenüber eingedrungenen Chloriden und daraus resultierender Bewehrungskorrosion in Trenn- und Biegerissen bei abgefahrenen Beschichtungen bei 5 bis 10 Jahren liegt [Raupach - 2005]. In wissenschaftlichen Untersuchungen konnte dies jedoch noch nicht belegt werden.

Eine weitere Problematik ergab sich bei der Wahl des richtigen Beschichtungssystems für das jeweilige Bauteil. So wurden z. B. anfänglich die Verformungen von Zwischendecken unterschätzt, sodass in sanierungsbedürftigen Ebenen von Parkbauten oftmals auch starre Beschichtungen (oder Beschichtungen mit nicht ausreichender Rissüberbrückungsfähigkeit) verwendet wurden. Folglich wurden die Risse durch das Beschichtungssystem an der Oberfläche erneut sichtbar ([Schöppel - 2002], [Raupach - 2005]). Aus diesem Grund gab die „Münchner Runde“ (Zusammenschluss von Fachleuten in der Betoninstandsetzung aus dem Raum München) in ihren Veröffentlichungen u. a. die Empfehlung, dass bei Neubauten Zwischendecken mit einer rissüberbrückenden Beschichtung versehen werden sollen ([Münchner Runde - 2010], [Münchner Runde - 2013]).

Des Weiteren werden Parkbauten, entgegen den vorliegenden Beanspruchungen, nach geltendem Regelwerk den Hochbauten zugeordnet und nicht als Verkehrsbauwerke wie Bundesfernstraßen oder Brücken betrachtet, obwohl deren Beanspruchungen denen im Parkbau entsprechen (u. a. [Meyer - 2005], [Raupach - 2005], [Stenzel - 2010], [Wolff - 2010]). Dies hat entsprechende Folgen bei Planung und Ausführung bzgl. der Dauerhaftigkeit. Bei der Planung müssen zusätzlich zu den Festlegungen hinsichtlich Festigkeiten, Expositionsclassen und Betondeckungen, Schutzmaßnahmen für tausalz-beanspruchte (z. B. Fahrbahnen, Spritzwasserbereiche, usw.) und nicht-tausalzbeanspruchte (z. B. Deckenunterschichten, Bereiche ohne Spritzwasser, usw.) Bauteile berücksichtigt werden [Schöppel u. Stenzel - 2012].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass an Beschichtungssysteme hohe und vielfältige Anforderungen hinsichtlich der „Rissüberbrückungsfähigkeit, Haftung zum Untergrund, Verschleißwiderstand, Griffbarkeit und der Dichtheit gegenüber beton- und stahlangreifenden Medien“ gestellt werden müssen [Jung et al. - 2005]. Zur Sicherstellung der geforderten Eigenschaften und zum Erhalt der Gewährleistungsansprüche sind befahrene Beläge, die eine erhöhte Verschleißbeanspruchung erfahren, mehrfach jährlich zu warten [Krams - 2011].

## **1.2 Zielsetzung**

Typische Schadensbilder bei befahrbaren Polymerbeschichtungen auf Beton resultieren aus der Nutzung des Bauteils, Umwelteinflüssen und dem Substrat (Abb. 1.2). Die Langlebigkeit einer befahrbaren Beschichtung in einem Parkbau wird dabei im Wesentlichen durch den Fahr- und Parkbetrieb beeinflusst [Wolff u. Raupach - 2008]. Während die normativ vorgegebenen Prüfverfahren und die zu bestimmenden mechanischen Kennwerte durchaus auf robuste Oberflächenschutzsysteme schließen lassen, ergibt sich in der Praxis ein anderes Bild

[Pusel et al. - 2018]. Handlungsbedarf gibt es daher beim Nachweis der Verschleißbeständigkeit von Beschichtungssystemen mit einem Verfahren, das die Beanspruchungen der Praxis widerspiegelt. Gegenwärtig eingesetzte Prüfverfahren sind aus anderen Bereichen der Materialprüfung entliehen, wodurch das am Parkbau durch mechanische Beanspruchung entstehende Schadensbild nicht befriedigend nachgestellt wird [Magner - 2012]. Die damit gewonnenen Daten erlauben keine wissenschaftlich fundierten Rückschlüsse bzgl. der Nutzungsdauer und Abnutzungsgeschwindigkeit [Fiebrich - 2013]. Die Bewertung der Verschleißbeständigkeit von befahrbaren Oberflächenschutzsystemen ist ein Forschungsschwerpunkt im deutschsprachigen Raum.

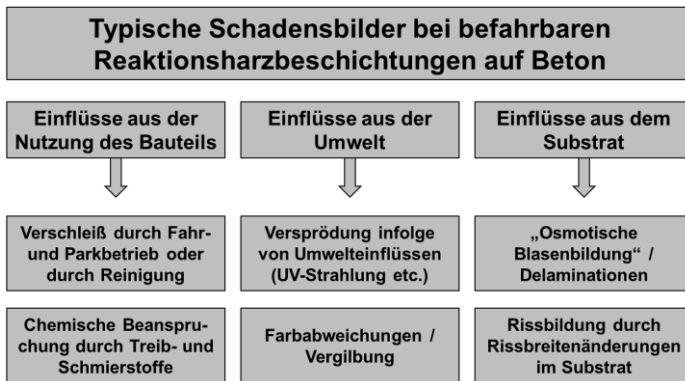


Abb. 1.2: Schadensbilder befahrbarer, polymerer Beschichtungen auf Beton nach [Wolff u. Raupach - 2008]

Das Ziel dieser Arbeit ist die (Weiter-)Entwicklung und Etablierung eines realitätsnahen Prüfverfahrens, sodass die Verschleißmechanismen von PKW befahrenen Beschichtungssystemen, wie sie in Parkbauten eingesetzt werden, besser abgebildet werden und die entsprechende normative Lücke geschlossen werden kann. Die Dauerhaftigkeit bzw. Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen wird von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Im Rahmen der Untersuchungen unter praxisüblichen Beanspruchungen werden auch maßgebliche Parameter wie die Mindestschichtdicke, die klimatischen Applikations- und Prüfbedingungen als auch das verwendete Größtkorn bzw. die Kornart der Abstreuerung untersucht bzw. identifiziert. So wird durch das Abstreukorn die Adhäsion der einzelnen Schichten untereinander mit beeinflusst. Mit den durchgeführten Versuchen soll gezeigt werden, dass der Einfluss dieser Parameter mit einem realitätsnahen Prüfverfahren abgebildet werden kann.

### 1.3 Vorgehensweise

Diese Dissertation gliedert sich in insgesamt acht Kapitel.

In Kapitel 1 werden die Problemstellung und die Relevanz aus der bzw. für die Praxis erörtert. Weiterhin gibt es einen Überblick über die in diesem Zusammenhang durchgeführten Forschungsvorhaben sowie über den Aufbau der Dissertation.

Ein Überblick über die normative Regelung und die Anforderungen sowie den Nutzen von Oberflächenschutzsystemen mit dem Schwerpunkt der Verschleißbeständigkeit wird in Kapitel 2 dargestellt. Aufbauend darauf werden die Systemaufbauten der befahrbaren Systeme inklusive eines kleinen Überblicks über die verwendeten Kunststoffarten erörtert. Auch werden die besonderen Herausforderungen in der Anwendung bzw. Praxis aufgezeigt. Hierzu zählen die Dauerhaftigkeit der befahrbaren Systeme, der Einfluss der Frequentierung und mögliche Anwendungsbereiche der einzelnen Systeme im Parkbau.

In Kapitel 3 werden zunächst die notwendigen Begrifflichkeiten der Tribologie und der verschiedenen Verschleißarten erörtert. Anschließend wird das Verschleißmodell der Verschleißentstehung und die tribologische Betrachtung des Lastfalls PKW auf Oberflächenschutzsystemen im Parkbau dargestellt und analysiert. Darauf aufbauend werden die normativen und nicht normativ-geregelten Verschleißprüfverfahren tribologisch analysiert und hinsichtlich des vorgenannten Verschleißmodells bzw. Lastfalls bewertet.

In Kapitel 4 wird der entwickelte Parking Abrasion Test detaillierter dargestellt. Neben dem Aufbau des Prüfstandes wird die Probekörperherstellung und der Ablauf der Verschleißversuche dargestellt.

Die zugehörige Messtechnik zur Dokumentation des Verschleißes wird in Kapitel 5 vorgestellt. Es wird dabei zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Schichtdickenermittlung unterschieden. Hierbei wird auch der menschliche Einfluss bei der Ermittlung und damit der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse berücksichtigt. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt auf einer 2D / 3D-Laserscannung, die ebenfalls für diese Anwendung adaptiert wurde.

Unter Berücksichtigung der in der Praxis vorherrschenden Bedingungen erfolgt die Evaluierung des Prüfstandes an marktüblichen Oberflächenschutzsystemen in Kapitel 6. Hierfür werden vergleichende Versuche mit dem BCA-Verfahren durchgeführt, wobei nachgewiesen werden kann, dass das normative Verfahren die Praxis nicht realitätsnah widerspiegelt. Weitere Vergleichsversuche werden mit dem Bänziger Rad, dem Prototyp des Parking Abrasion Test durchgeführt. Der Einfluss verschiedener Reifengeometrien auf die Verschleißbeständigkeit wird ebenfalls analysiert. Für die Evaluierung und die Auswahl der Systeme werden im Vorfeld Zugversuche durchgeführt und die Shore-Härten der einzelnen Komponenten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ermittelt. Weiterhin zeigt sich an entnommenen Bohrkernproben, dass die Deckversiegelungen z.T. nur minimal die Kornspitzen bedecken. Dies führt zu weiteren Versuchen zur Bewertung von Umwelteinflüssen hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit der Oberflächenschutzsysteme.

Gegenstand des Kapitels 7 sind die gewonnenen Schlussfolgerungen und Rückschlüsse für die Praxis.

In Kapitel 8 ist eine Zusammenfassung mit einem Ausblick hinsichtlich des Nutzens dieser Ergebnisse für die Normierung des Prüfverfahrens aufgeführt.

Das nachfolgende Ablaufschema (Abb. 1.3) gibt eine Übersicht über den Inhalt der einzelnen Kapitel mit den zugehörigen Fragestellungen wieder.



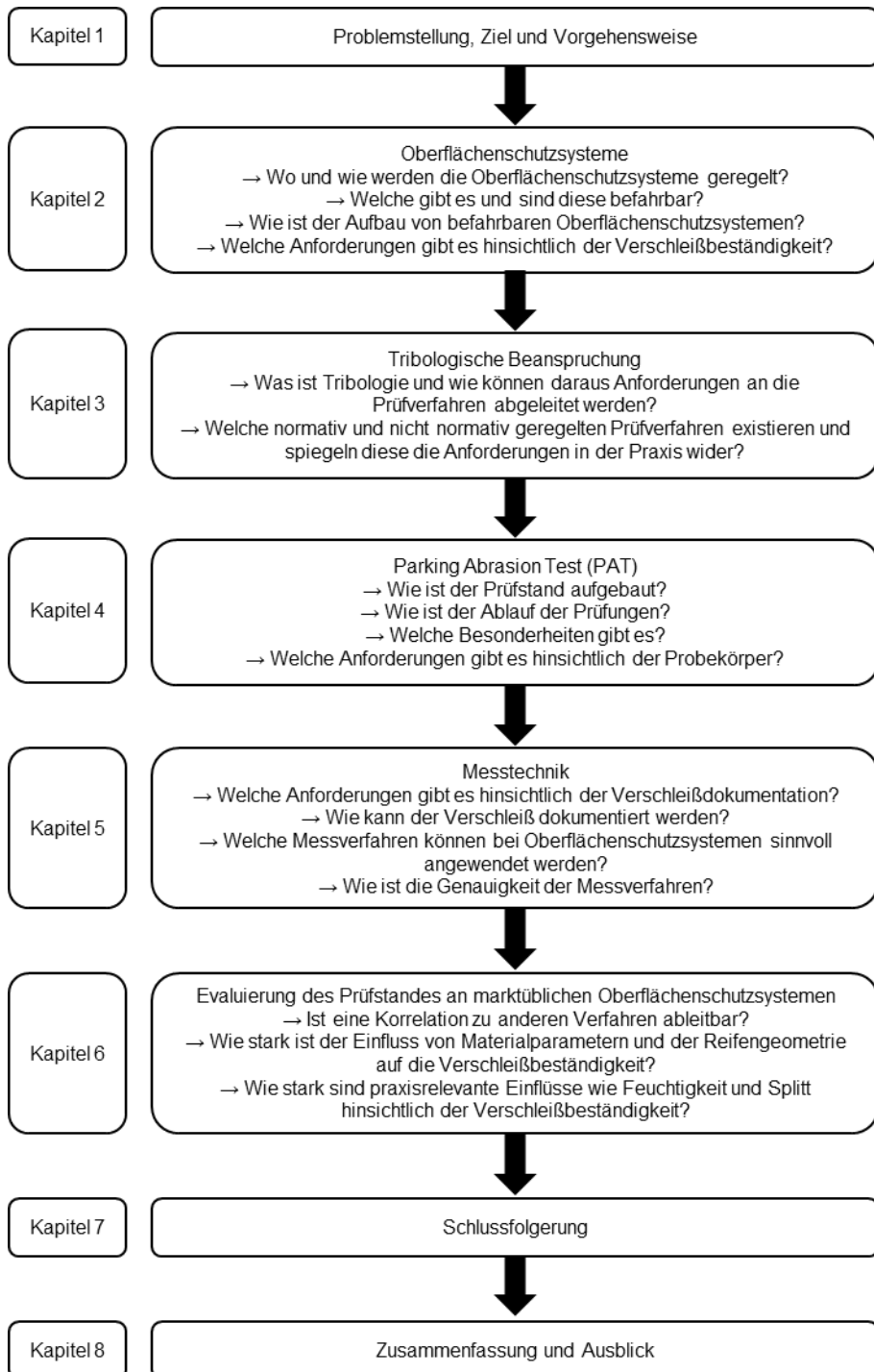


Abb. 1.3: Darstellung der Fragestellungen und der Vorgehensweise dieser Arbeit

Die im Rahmen dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse basieren auf den nachfolgend aufgeführten Forschungsvorhaben:

- Nachweis der Verschleißbeständigkeit von Parkhausbeschichtungssystemen unter realitätsnahen Prüfbedingungen [Breit et al. - 2015a]
- Dauerhaftigkeit von rissüberbrückungsfähigen Beschichtungssystemen unter realitätsnaher Beanspruchung [Breit u. Ladner - 2017a]
- Praxisnahe Bewertung des Verschleißverhaltens von befahrenen Oberflächenschutzsystemen - Praxistest vs. Normprüfung [Breit et al. - 2019]
- Festlegung von Verschleißklassen für Oberflächenschutzsysteme in Parkhäusern in Abhängigkeit von der Nutzungsfrequenz durch vergleichende Bewertung nach BCA- und PAT-Verfahren [Breit u. Ladner - 2018]
- Untersuchungen zu Umwelteinflüssen auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen während der Applikations- und Nutzungsphase [Breit et al. - 2021]

Die Ergebnisse der vorgenannten Forschungsvorhaben mündeten in einen beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Förderschiene "WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen" bewilligten Normungsantrag mit dem Titel „Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen mit Hilfe des Parking Abrasion Test (PAT-Verfahren)“.

## **2 Oberflächenschutzsysteme**

### **2.1 Allgemeines**

Ein dauerhaftes Bauwerk wird als ein Tragwerk beschrieben, das „während der vorgesehenen Nutzungsdauer seine Funktion hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften bei einem angemessenen Instandhaltungsaufwand erfüllt“ [DIN EN 1992-2]. Bei der Planung von Parkbauten wird von einer Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgegangen. Stahlbetonbauteile sind üblicherweise dauerhaft, wenn die Zusammensetzung des Betons nach [DIN EN 206] und [DIN EN 1045-2] erfolgt, eine ausreichende Betondeckung vorliegt, die Rissbreitenbegrenzung sowie die Verarbeitung nach [DIN EN 1045-3], insbesondere der Nachbehandlung, ausgeführt wird.

Die verschiedenen Beanspruchungen, die auf das Bauwerk (ein-)wirken, können zu unterschiedlichen Schäden am Tragwerk führen. Als Einwirkungen sind physikalische und chemische Einflüsse zu unterscheiden, die die Dauerhaftigkeit von Parkbauten beeinträchtigen können [DIN EN 1992-2]. Karbonatisierung und chloridinduzierte Korrosion, Frost-Tausalz-Beanspruchung und ggf. Verschleiß sind die wesentlichen dauerhaftigkeitsbegrenzenden Einwirkungen bei Parkbauten. Physikalische Beanspruchungen resultieren im Wesentlichen aus Temperaturschwankungen sowie Frost bzw. Frost-Tau-Wechsel, Abrieb durch PKW-Verkehr und dem Eindringen von Wasser. Diese können zu Rissen und Abplatzungen führen. Chemisch kann dieser Angriff noch durch den Eintrag von Tausalzen bzw. chloridhaltigen Wässern in den Wintermonaten verstärkt werden und zu Bewehrungskorrosion führen bzw. den Korrosionsprozess beschleunigen. All diese baupraktischen Besonderheiten erfordern zusätzliche Maßnahmen in Parkbauten, die durch Oberflächenschutzsysteme abgedeckt werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden daher die Anwendungsbereiche, Arten, Aufbauten und Funktionsweisen der Oberflächenschutzsysteme erörtert. Weiterhin werden die maßgebenden Regelwerke in Deutschland und die material- und nutzungsbedingten Parameter für die Verschleißbeständigkeit aufgezeigt.

### **2.2 Arten**

Es werden folgende Arten von Oberflächenschutzsystemen unterschieden [DAfStb - 2001]:

- Hydrophobierung
- Imprägnierung
- Beschichtung

In Abb. 2.1 sind die verschiedenen Oberflächenschutzsysteme gegenübergestellt. Hydrophobierungen (OS 1) verändern die Betonoberfläche optisch nicht bzw. nur unwesentlich. Das Ziel von Hydrophobierungen ist die Applikation einer wasserabweisenden Schicht auf der Betonoberfläche, wobei die Poren der Betonoberfläche dabei nur ausgekleidet und nicht verfüllt werden. Bei der Versiegelung bzw. Imprägnierung werden die Poren und die Betonoberfläche mit einem ungleichmäßigen Film mit einer Dicke von bis zu 300 µm verfüllt. Dieser

verhindert das Eindringen flüssiger oder gasförmiger Stoffe in den Beton und reduziert die Oberflächenporosität. Beschichtungen (OS 2 bis OS 13) können dagegen als Dünn- und Dickbeschichtung mit einem gleichmäßigen Film ausgeführt werden. Gasförmige und flüssige Stoffe können über eine intakte Beschichtung nicht in den Beton eindringen. Trotzdem ermöglichen diese Systeme noch ein Austrocknen des Betons und schützen die Oberfläche vor mechanischen und chemischen Angriffen. Die z. T. rissüberbrückenden und befahrbaren Beschichtungssysteme verfügen i. d. R. über mehrere Einzelschichten in Abhängigkeit von deren Aufgabe. Die befahrbaren Oberflächenschutzsysteme werden der Dickbeschichtung zugeordnet. Auf diese wird in den nächsten Abschnitten näher eingegangen.

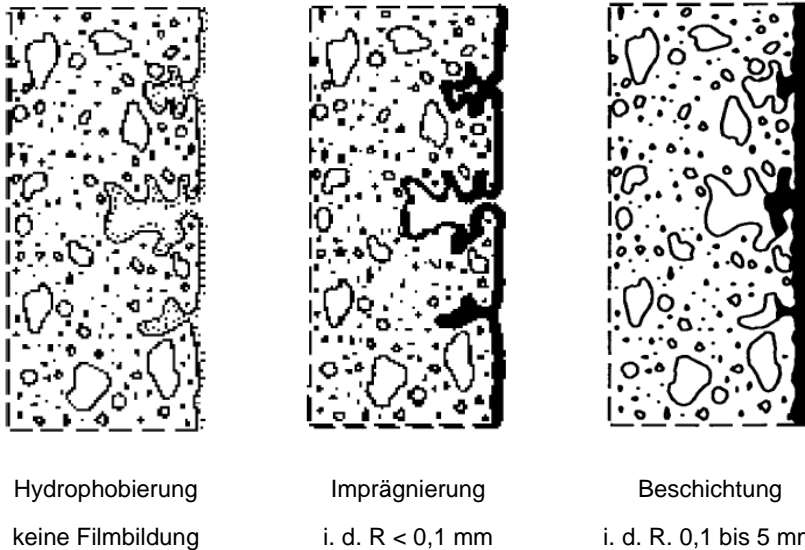


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Wirkungsweise von Hydrophobierung, Imprägnierung und Beschichtung aus [DIN EN 1504-2]

Die wesentlichen Anforderungen, die ein Oberflächenschutzsystem erfüllen muss, sind nachfolgend genannt:

- Gute Haftung
- Geringer E-Modul
- Geringe Wasseraufnahme
- Ggf. rissüberbrückende Eigenschaften
- Abriebfestigkeit / Verschleißbeständigkeit
- Rutschhemmung

Neben der DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie)“ [DAfStb - 2001] gibt es von der Bundesanstalt für Straßenwesen „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)“ [ZTV-ING - 2017]. In der [ZTV-ING - 2017] sind die Oberflächenschutzsysteme ebenfalls aufgeführt, werden allerdings nicht numerisch, sondern alphabetisch gelistet (z. B. OS 1 = OS A). Weiterhin gelten die Vertragsbedingungen nur für Ingenieurbauwerke (Straßen und Wege) nach

[DIN 1076], jedoch nicht für Parkbauten, die den Hochbauten zugeordnet werden. Die Anforderungen aus der Instandsetzungsrichtlinie spiegeln weitestgehend die Anforderungen in der [ZTV-ING - 2017] wider. Nachfolgend wird sich daher nur auf die Bezeichnungen und Anforderungen aus der Instandsetzungs- [DAfStb - 2011] bzw. des Gelbdrucks der Instandhaltungsrichtlinie [DAfStb - 2016] bezogen.

## **2.3 Aufbau und Funktionsweise befahrbarer Oberflächenschutzsysteme**

### **2.3.1 Allgemeines**

Insgesamt werden zehn verschiedene Oberflächenschutzsysteme unterschieden, wovon vier zu den befahrbaren Systemen zählen. Der Aufbau (z. B. starr oder rissüberbrückend) variiert je nach Einsatzgebiet und ist in der derzeit gültigen Instandsetzungsrichtlinie [DAfStb - 2001] geregelt. Rissüberbrückend bedeutet, dass nachträglich entstehende Risse im Stahlbeton durch das Oberflächenschutzsystem „abgefangen / überbrückt“ werden, sodass diese an der Oberfläche nicht sichtbar werden und keine schädlichen Medien eindringen können. Beschichtungssysteme bestehen aus mehreren einzelnen Schichten, die nach der Aushärtung der vorherigen Schicht (ca. 1 Tag später), appliziert werden.

Für die Applikation eines Oberflächenschutzsystems muss die Oberfläche eine ausreichende Rauigkeit aufweisen, damit eine gute Haftung (Verkrallung) des Beschichtungssystems zum Untergrund erzielt wird. Dies kann bspw. durch Sand- oder Hochdruckwasserstrahlen erreicht werden. Die Oberflächenbehandlung und Bestimmung der Rautiefe erfolgt nach [DIN EN 1766]. Die geforderten Mindestdickheiten in Abhängigkeit von der Rautiefe sind in der Instandsetzungsrichtlinie [DAfStb - 2001] geregelt.

Die Funktionen der einzelnen Schichten sind nachfolgend beschrieben. Die Grundierung ist die erste Schicht, die auf einer gestrahlten und gereinigten Betonoberfläche in Form einer Kratzspachtelung und Egalisierung appliziert wird und den Untergrund verfestigt. Grundierungen dringen zum Teil in die Poren der Betonoberfläche ein und ermöglichen einen besseren Verbund zwischen der Betonoberfläche und dem Oberflächenschutzsystem. Die Hauptaufgabe der Grundierung ist der Verschluss der vorhandenen Poren. Luft, Feuchtigkeit und beschichtungsschädliche Stoffe können so nicht mehr aus dem Untergrund in die anschließend aufgetragenen Schichten eindringen. Grundierungen werden i. d. R. flutend aufgebracht und mit Quarzsand (Korngröße 0,3 bis 0,8 mm) abgestreut, sodass eine gute Adhäsion (Haftung) der nachfolgenden Schicht ermöglicht wird.

Ziele der darauf aufgetragenen „hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschicht“ (hwO) sind die Wasserdampfdurchlässigkeit bei gleichzeitiger Wasserdichtigkeit, Kohlenstoffdioxid-dichtigkeit, Rissüberbrückungsfähigkeit und / oder Verschleißfestigkeit [DAfStb - 2001]. Die hwO wird aus Polyurethanen, modifizierten Epoxidharzen oder 2-K-Polymethylmethacrylaten (bzw. beim OS 14-System (siehe Abschnitt 2.3.5) auch aus Polyurea oder Epoxidharzen) hergestellt und besteht aus einer oder zwei Schichten in Abhängigkeit vom gewählten Oberflächenschutzsystem. Ist die hwO als eine Schicht ausgeführt (verschleißfeste, gleichmäßig gefüllte und

abgestreute Deckschicht (hwO)), so wird diese als Verschleißschicht bezeichnet. Dies ist die Schicht, die nach dem Abrieb der Deckversiegelung direkt dem Verschleiß ausgesetzt ist. Aus diesem Grund muss die Verschleißschicht weitere Anforderungen an die Ebenheit, Griffigkeit und Wetterbeständigkeit erfüllen. Die Verschleißschicht muss daher sowohl rissüberbrückend als auch robust gegenüber Verschleißbeanspruchung sein. Beim Zweischichtsystem wird die hwO in Schwimm- und Verschleißschicht untergliedert. Die Schwimmschicht übernimmt dabei die Funktion der Rissüberbrückung und die Verschleißschicht sorgt für einen hohen Verschleißwiderstand. Die Schwimmschicht, mit einer Mindestdicke von 1,5 bis 2,0 mm, wird weder verfüllt noch mit Quarzsand abgestreut. Der Verbund zur nächsten Schicht wird aufgrund der noch nicht abgeschlossenen Polymerreaktion zum Zeitpunkt der Applikation der Verschleißschicht ermöglicht. Die Verschleißschicht (Dicke 3,0 bis 5,0 mm) wird wie auch beim Einschichtsystem mit Quarzsand verfüllt und abgestreut. Die Verfüllung erfolgt i. d. R. mit Quarzsand 0,1 bis 0,4 mm und die anschließende Abstreuerung mit Quarzsand 0,3 bis 0,8 mm bzw. 0,7 bis 1,2 mm.

Zu beachten ist, dass der Begriff Verschleißschicht insofern irreführend ist, da er impliziert, dass etwas verschlissen werden darf (siehe auch [Wolff u. Schwamborn - 2017]). Tatsächlich ist dies jedoch nicht vorgesehen und wird bei der Zulassung der Systeme auch nicht überprüft. Während ein Eindringen von Stoffen in den Betonuntergrund vermutlich weiterhin verhindert werden kann, können Eigenschaften aus der Grund- und Erstprüfung wie die Rissüberbrückungsfähigkeit nur noch bedingt garantiert werden.

Die Deckversiegelung ist die abschließende, oberste und farbgebende Schicht eines Beschichtungssystems. Sie bindet die Quarzkörner ein und verhindert ein zu leichtes Ausbrechen von Quarzkörnern und das Eindringen von Feuchtigkeit in das System. Weiterhin sorgt sie für Beständigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Angriffen wie auch UV-Strahlung bei freibewitterten Parkdecks.

In Abhängigkeit von den zu erwartenden Verformungen (Risse und Rissbreiten) erfolgt die Entscheidung für den Einsatz eines starren oder rissüberbrückenden OS-Systems. Bei den vier befahrbaren Oberflächenschutzsystemen handelt es sich um OS 8, OS 11, OS 13 und OS 10/14. Die nachfolgend erläuterten Oberflächenschutzsysteme können alle der Ausführungsvariante B des Merkblatts „Parkhäuser und Tiefgaragen“ [DBV - 2018] des DBV zugeordnet werden. Ist davon auszugehen, dass keine Risse zu erwarten sind, wird i. d. R. das starre Oberflächenschutzsystem 8 (Abschnitt 2.3.2) aufgebracht. Das Oberflächenschutzsystem 11 (Abschnitt 2.3.3) kann bei Rissbreiten bis maximal 0,3 mm eingesetzt werden. Hier kann in Abhängigkeit von der Bewitterung zwischen dem ein- oder zweischichtigen Aufbau unterschieden werden. Starre Systeme sind im Vergleich zu den rissüberbrückenden deutlich robuster gegenüber mechanischer Beanspruchung [Bolz u. de Hessele - 2005]. Beim Oberflächenschutzsystem OS 10 (Abschnitt 2.3.5) handelt es sich nicht um ein vollständiges System, sondern nur um einzelne Produkte nach [DIN EN 1504-2]. Im Gegensatz zu den anderen befahrbaren Systemen, findet hier gegenwärtig keine Systemprüfung statt, sondern die einzelnen Komponenten werden nur hinsichtlich ihrer Eigenschaften geprüft. Zusätzlich kann ein OS 10-System eine polymere, aber auch bituminöse Abdichtung sein. Das OS 13 wird in der gegenwärtigen Richtlinie für Schutz und Instandsetzung noch aufgeführt, ist aber bereits im Gelbdruck

[DAfStb - 2016] der neuen DAfStb-Instandhaltungsrichtlinie nicht mehr enthalten, da es sich in der Baupraxis in Deutschland nicht bewährt hat. In Österreich wird dieses System weiterhin appliziert. Dafür wurde das Oberflächenschutzsystem OS 14 in Deutschland neu aufgenommen, das im Grundsatz einem geregelten OS 10 mit polymerer Deckschicht entspricht. Dieses findet vor allem bei schnellen Instandsetzungen (Faktor „Zeit“) Anwendung. Ein OS 10 mit Schutz- und Deckschicht aus Gussasphalt wird in [DIN 18532-6] geregelt [siehe auch Wolff - 2018a]. Die entsprechende Regelungslücke wird somit geschlossen.

### 2.3.2 Oberflächenschutzsystem 8

OS 8-Systeme zählen zu den starren Beschichtungssystemen ohne rissüberbrückende Eigenschaften für begeh- und befahrbare Flächen. Der Aufbau dieses Systems, wie in Abb. 2.2 und Abb. 2.3 dargestellt, untergliedert sich in eine abgestreute Grundierung, die hwO und eine Deckversiegelung. Die Gesamtschichtdicke beträgt bei reinen Schutzmaßnahmen 1,5 mm und bei Instandsetzungen 2,5 mm. OS 8-Systeme werden aufgrund hoher verschleißfester Eigenschaften bei mechanisch stark beanspruchten Flächen wie bspw. Bodenplatten, Rampen und Industrieböden eingesetzt.

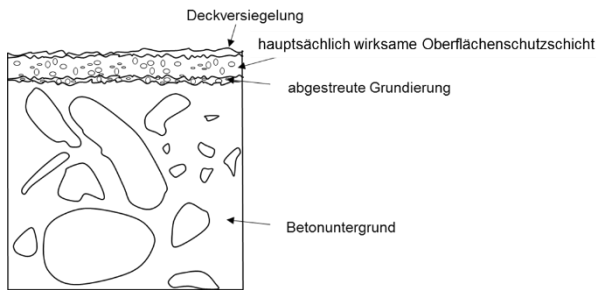


Abb. 2.2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 8-Systems

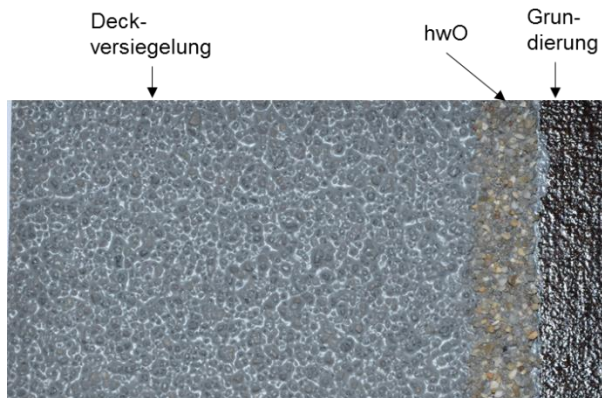


Abb. 2.3: Schichtaufbau anhand eines OS 8-System-Musters

### 2.3.3 Oberflächenschutzsystem 11

Die OS 11-Systeme können in zwei Varianten appliziert werden, die beide eine erhöhte dynamische Rissüberbrückungsfähigkeit aufweisen und begeh- sowie befahrbar sind. Unterschieden werden diese in ein- und zweischichtigen Aufbau (OS 11b: „Einschichter“, Abb. 2.4 und OS 11a: „Zweischichter“, Abb. 2.6).

OS 11b-Systeme (Abb. 2.4 und Abb. 2.5) werden bei nicht freibewitterten Flächen mit Rissbewegungen eingesetzt. Der Aufbau der Systeme unterteilt sich in eine abgestreute Grundierung, verschleißfeste, vorgefüllte und anschließend abgestreute Verschleißschicht (hwO) und eine Deckversiegelung. Der Aufbau des Beschichtungssystems soll mindestens 4,0 mm betragen. Aufgrund der dünnschichtigeren Ausbildung der hwO sind diese Systeme i. d. R. weniger widerstandsfähig gegenüber Verschleißbeanspruchung als der Zweischichter (z. B. [Wolff - 2010]).

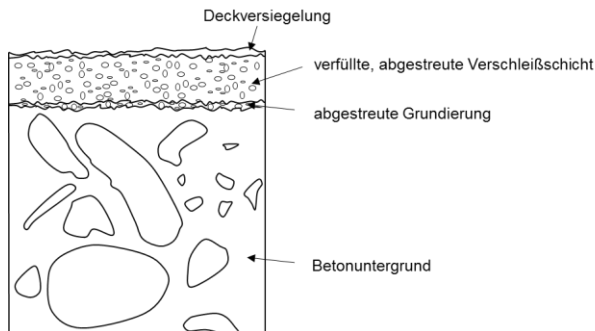


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 11b-Systems

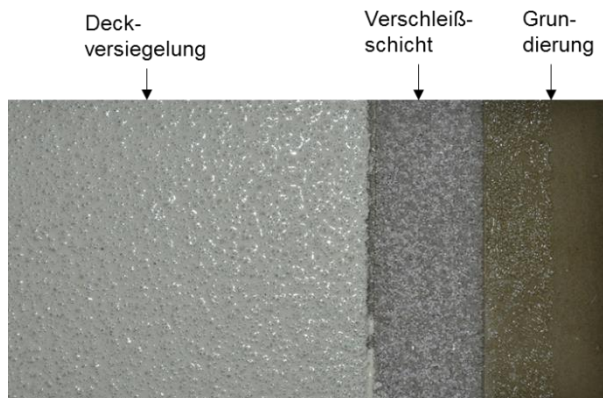


Abb. 2.5: Schichtaufbau anhand eines OS 11b-System-Musters

OS 11a-Systeme (Abb. 2.6 und Abb. 2.7) verfügen über einen zweischichtigen Aufbau, d. h. die hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschicht besteht aus Schwimm- und Verschleißschicht. Der restliche Systemaufbau erfolgt analog zum Einschichter: Abgestreute Grundierung, nicht verfüllte und abgestreute Schwimmschicht, verschleißfeste, vorgefüllte und anschließend abgestreute Verschleißschicht (hwO)



und eine Deckversiegelung. Einsatzgebiete dieses Systems sind vorwiegend freibewitterte und überdachte Flächen mit oberflächennahen Rissen und / oder Trennrissen. Weitere Verwendung finden diese Systeme bspw. im Sprüh- und Spritzbereich von Parkhaus-Freidecks und Brückenkappen. Die Gesamtschichtdicke ist aufgrund der zusätzlichen Schicht 0,5 mm höher als beim OS 11b-System, sodass sie mindestens 4,5 mm beträgt (Schwimmschicht 1,5 mm und Verschleißschicht 3,0 mm).

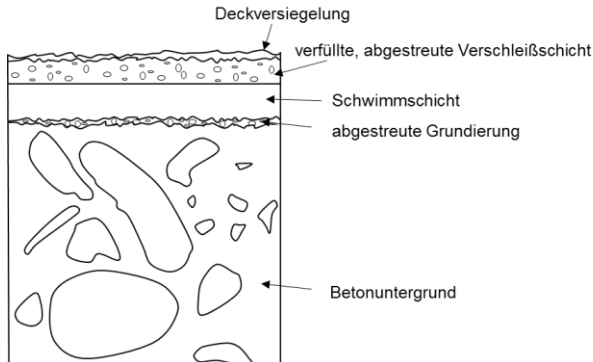


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 11a-Systems



Abb. 2.7: Schichtaufbau anhand eines OS 11a-System-Musters

### 2.3.4 Oberflächenschutzsystem 13

OS 13 (Abb. 2.8 und Abb. 2.9) ist ebenfalls ein rissüberbrückendes System, das jedoch keine dynamische, sondern nur eine statische Rissüberbrückungsfähigkeit besitzt. Aufgrund dieser Eigenschaften konnte es sich in der Praxis nicht durchsetzen, weshalb es im Gelbdruck der DAfStb-Instandhaltungsrichtlinie [DAfStb - 2016] nicht mehr enthalten ist. Einsatzgebiete dieses Systems waren begeh- und befahrbare überdachte Flächen, mechanisch belastete Flächen mit oberflächennahen Rissen sowie Bereiche in denen Auftausalze eingesetzt werden. Der Aufbau des Systems ähnelt dem des OS 11b-Systems: Abgestreute Grundierung, ggf. vorgefüllte und

abgestreute Verschleißschicht und einer Deckversiegelung. Die Gesamtschichtdicke des OS 13-Systems beträgt mindestens 2,5 mm.

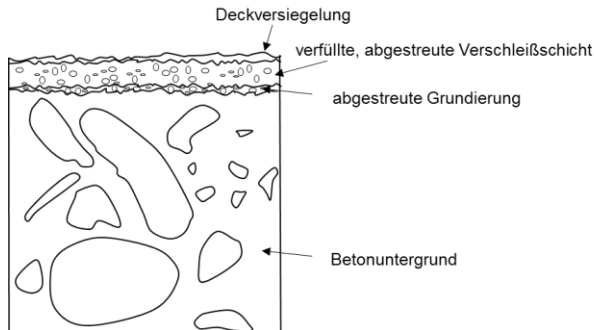


Abb. 2.8: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 13-Systems

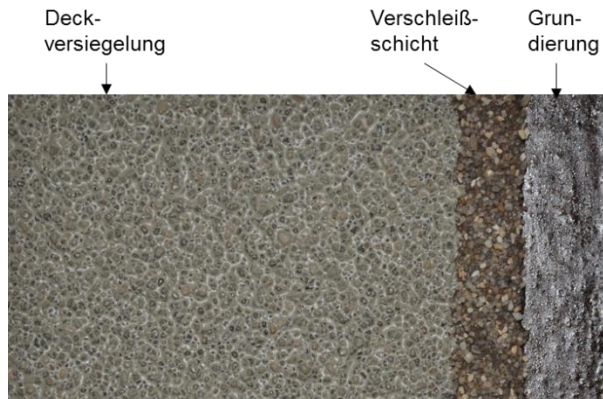


Abb. 2.9: Schichtaufbau anhand eines OS 13-System-Musters

### 2.3.5 Oberflächenschutzsystem 10 bzw. 14

OS 14-Systeme (Abb. 2.10 und Abb. 2.11) werden erstmalig in [DAfStb - 2016] genannt. Diese entsprechen der Systemlösung des OS 10-Systems auf polymerer Basis.

Bei den OS 14-Systemen handelt es sich um Systeme mit hoher dynamischer Rissüberbrückungsfähigkeit. Der Aufbau entspricht i. W. dem des OS 11a-Systems, wobei die Schwimmschicht mit einer zusätzlichen Einlage (z. B. Vlies) ausgeführt werden darf und die hwO in höheren Schichtdicken ausgeführt werden.

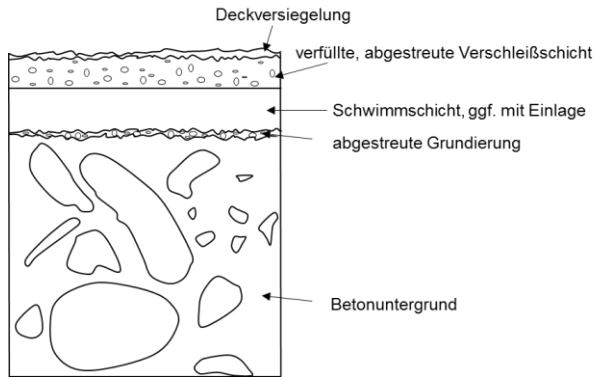


Abb. 2.10: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 10 / 14-Systems

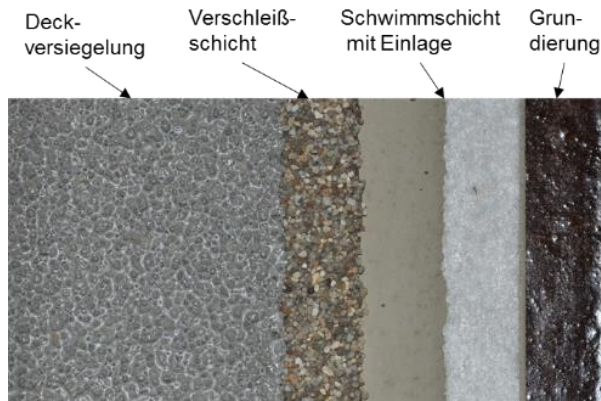


Abb. 2.11: Schichtaufbau anhand eines OS 10-System-Musters

### 2.3.6 Gegenüberstellung der befahrbaren Beschichtungssysteme

In Tab. 2.1 sind alle befahrbaren Beschichtungssysteme auf Polymerbasis nach der Instandsetzungsrichtlinie und dem Gelbdruck der Instandhaltungsrichtlinie dargestellt ([DAfStb - 2001], [DAfStb - 2016]).

Tab. 2.1: Gegenüberstellung der befahrbaren Beschichtungssysteme OS 8, OS 11a, OS 11b, OS 13 und OS 14 nach ([DAfStb - 2001], [DAfStb - 2016])

Bezeichnung	OS 8	OS 11a OS 11b	OS 14 (OS 10)	OS 13
	Nach [DAfStb - 2016]			Nach [DAfStb - 2001]
Kurzbeschreibung	Starre Beschichtung für befahrbare, mechanisch stark belastete Flächen	Beschichtung mit erhöhter dynamischer Rissüberbrückungsfähigkeit für begehbare und befahrbare Flächen	Beschichtungssystem mit hoher dynamischer Rissüberbrückung, mit integrierter Nutzschicht, direkt befahrbar (mit / ohne Einlage), bestehend aus einem flexiblen Reaktionsharz und einer zusätzlichen Nutzschicht aus Reaktionsharz (ungefüllt / gefüllt), mit ggf. mineralischer Einstreuung und ggf. Deckversiegelung	Beschichtung mit nicht dynamischer Rissüberbrückungsfähigkeit für begehbare und befahrbare, mechanisch belastete Flächen
Anwendungsbereich	Alle mechanisch und chemisch beanspruchten Betonflächen, z. B. Bahnbahnen, Rampen, Industrieböden	Freibewitterte Betonbauteile mit oberflächennahen Rissen und / oder Trennrissen und planmäßiger mechanischer Beanspruchung auch im Spritzbereich von Auftausalzen z. B. Parkhaus-Freidecks und Brückenkappen	Oberflächenschutzschicht für Betonbauteile mit Trennrissen und planmäßiger mechanischer Beanspruchung, z. B. Brücken und direkt befahrene freibewitterte Parkdecks, sowie Betonbauteile im Erdreich, die möglicher Chlorideinwirkung unterliegen können, z. B. Streifenfundamente unterhalb von gepflasterten Parkdecks	Mechanisch und chemisch beanspruchte überdachte Betonbauteile mit oberflächennahen Rissen auch im Einwirkungsbereich von Auftausalzen, z. B. geschlossene Park- und Tiefgaragen

Tab. 2.1: Gegenüberstellung der befahrbaren Beschichtungssysteme OS 8, OS 11a, OS 11b, OS 13 und OS 14 nach ([DAfStb - 2001], [DAfStb – 2016]) (Fortsetzung)

Bezeichnung	OS 8	OS 11a OS 11b	OS 14 (OS 10)	OS 13
	Nach [DAfStb - 2016]			Nach [DAfStb - 2001]
Aufbau	1. Grundierung 2. Verschleißfeste, ggf. vorgefüllte Oberflächenschutz- schicht abgestreut, ggf. mehrlagig 3. Ggf. Deckversiegelung	a) 1. Grundierung 2. Elastische Oberflächenschutz- schicht (hwO, Schwimmschicht) 3. Verschleißfeste vorgefüllte Deckschicht, abgestreut (hwO) 4. Ggf. Deckversiegelung b) 1. Grundierung 2. Verschleißfeste, vorgefüllte Oberflächenschutz- schicht, abgestreut (hwO) 3. Deckversiegelung	1. Grundierung 2. Elastische Oberflächenschutz- schicht mit / ohne Einlage (hwO, Schwimmschicht) 3. Verschleißfeste vorgefüllte Deckschicht, abgestreut (hwO) 4. Ggf. Deckversiegelung	1. Grundierung 2. Verschleißfeste ggf. vorgefüllte Oberflächenschutz- schicht, abgestreut 3. Deckversiegelung
Bindemittel- gruppe	Epoxidharz, 2K- Polymethylmethacrylat	Polyurethan, Mod. Epoxidharze, 2K- Polymethylmethacrylat	Polyurethan, Polyurea Epoxidharze, Mod. Epoxidharze, 2K- Polymethylmethacrylat	Mod. Epoxidharze, Polyurethan, 2K- Polymethylmethacrylat
Rissüber- brückung	keine	Nach [DIN EN 1062-7] B 3.2 (-20 °C)	Nach [DIN EN 1062-7] B 4.2 (-20 °C)	Klasse A1 (-10 °C)

## 2.4 Regelwerke

### 2.4.1 Allgemeines

Nachfolgend werden die wesentlichen Regelwerke erläutert, die für Oberflächenschutzsysteme maßgebend sind. Diese werden in Produkt-, Prüf- und Anwendungsregeln unterschieden. Bei den Prüf- und Anwendungsregeln werden schwerpunktmäßig die Regelungen aufgeführt, die die Verschleißbeständigkeit behandeln bzw. deren Anforderungen einen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit haben können.

### 2.4.2 Produktregeln

Mit der Einführung der europäischen Produktnormen DIN EN 1504 „Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken“ wurde in Deutschland - als Bindeglied zwischen der [DIN EN 1504-2] („Oberflächenschutzprodukte und -systeme für Beton“) und der DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ [DAfStb - 2001] - die Vornorm [DIN V 18026] („Oberflächenschutzsysteme für Beton aus Produkten nach DIN EN 1504-2“) für befahrbare Oberflächenschutzsysteme eingeführt. Nach [DIN V 18026] müssen für die Gewährleistung des Schutzes von Betonoberflächen bestimmte Leistungsmerkmale erfüllt sein. Grund für die Einführung der [DIN V 18026] war, dass in [DIN EN 1504-2] nicht die Systemeigenschaften, sondern nur die Produktmerkmale (CE-Kennzeichnung) geprüft werden. Dies hat zur Folge, dass wesentliche Leistungsmerkmale in [DIN EN 1504-2] fehlen. Beschichtungssysteme sind daher nur Komponenten unterschiedlicher CE-Produkte, deren Produkt- und Systemeigenschaften nach [DIN EN 1504-2] nicht abgeprüft werden müssen. Nach dem EuGH-Urteil von 2014 [EuGH - 2014] sind zusätzliche Anforderungen an bestimmte Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung jedoch nicht zulässig. In der DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie)“ [DAfStb - 2001] werden neben der Definition der einzelnen Oberflächenschutzsysteme hinsichtlich ihres Aufbaus die notwendigen Produkteigenschaften angegeben. 2016 wurde die Überarbeitung der Instandsetzungsrichtlinie in Form eines Gelbdrucks für die geplante Instandhaltungsrichtlinie [DAfStb - 2016] veröffentlicht. Ziel war es darin die zusätzlichen Anforderungen an Oberflächenschutzsysteme, die nicht in der [DIN EN 1504-2] enthalten sind, zu regeln, sodass das technische Niveau gehalten wird. In [DAfStb - 2016] wurden z. T. signifikante Änderungen veröffentlicht, auf die in dieser Arbeit entsprechend verwiesen wird. Das Gelbdruckverfahren konnte jedoch nicht abgeschlossen werden, da die Produkthersteller diesen Entwurf für nicht europarechtskonform halten und mit einer Klage gedroht wurde. Daraufhin hat das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) eine „Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken“ 2019 im Wesentlichen auf Basis der Instandsetzungsrichtlinie veröffentlicht. Die Teile 1 (Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung) und 2 (Merkmale von Produkten oder Systemen für die Instandsetzung und Regelungen für deren Verwendung) wurden bei der Europäischen Kommission zur Prüfung eingereicht. Aufgrund von Einsprüchen anderer EU-Länder hat die Kommission Bedenken bzgl. der Einführung geäußert und es wird eine weitere Überarbeitung notwendig sein, sodass eine Einführung in 2021 bundesweit nicht möglich sein wird.

In 2019 hat das DIBt für die Überbrückung der rechtlichen Grauzone eine Prioritätenliste mit zusätzlichen Leistungsmerkmalen eingeführt [DIBt - 2019]. Nach dieser sind alle Leistungen im System zu prüfen. Der Nachweis kann mit einer ETA (Europäische Technische Bewertung) oder nach [DIN V 18026] oder durch ehemalige Dokumentationsunterlagen erfolgen (siehe auch [Wolff - 2018b]).

### **2.4.3 Prüfregele**

Oberflächenschutzsysteme unterliegen mechanischen Beanspruchungen, die der Beanspruchungsgruppe III nach [DIN 18560-7] zuzuordnen sind. Die Prüfung bzw. Zulassung von Oberflächenschutzsystemen hinsichtlich der Abriebsfestigkeit erfolgt nach [DIN V 18026] mit dem „Taber-Abriebverfahren“ nach [DIN EN ISO 5470-1]. Da Oberflächenschutzsysteme hauptsächlich mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, sind auch die Anforderungen aus [DIN EN 13813] nachzuweisen. Dies bedeutet, dass zum Nachweis der Verschleißwiderstand zusätzlich das „BCA-Verfahren“ nach [DIN EN 13892-4] oder das „RWA-Verfahren (Verschleißwiderstand gegen Rollbeanspruchung)“ nach [DIN EN 13892-5] herangezogen werden müssen. Hierbei müssen mindestens die Klassen AR1 (BCA-Verfahren) oder RWA10 (RWA-Verfahren) nach [DIN EN 1504-2] bzw. [DIN EN 13813] erreicht werden. Mit Einführung der [DIN EN 1504] und damit auch der [DIN V 18026] war es seit Januar 2009 nicht mehr zulässig nach [DAfStb - 2001] die „Stuttgarter Prüfung“ in Anlehnung an [DIN EN 660-1] zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit sowie das „Taber-Abriebverfahren“ für die Abriebsfestigkeit vor heranzuziehen. Nach der „Technischen Regel Instandhaltung von Betonbauwerken“, welche auf [DAfStb - 2001] basiert, soll der Verschleißwiderstand mit dem „BCA- oder RWA-Verfahren“ bestimmt werden, am Bauteil kann dagegen die Prüfung der Verschleißfestigkeit mit der „Stuttgarter Prüfung“ erfolgen. Aktuell ist nach [DIBt - 2019] die Abriebsfestigkeit mit dem „Taber-Abriebverfahren“ ([DIN EN ISO 5470-1]) und der Verschleißwiderstand mit dem „BCA-Verfahren“ ([DIN EN 13892-4]) oder dem „RWA-Verfahren“ ([DIN EN 13892-5]) zu bestimmen. Bei allen genannten Verfahren wird der Verschleiß von der Oberfläche induziert. Weitere Einflüsse auf die Verschleißbeständigkeit aus Verschmutzung und Temperatur werden nicht berücksichtigt (siehe auch [Schwamborn u. Wolff - 2012]).

Weitere Faktoren, die einen Einfluss auf das Verbundverhalten der Systeme und damit auf die Verschleißbeständigkeit haben, sind die Haftfestigkeit (nach Prüfung auf Temperatur-Wechsel-Verträglichkeit), Rissüberbrückungsfähigkeit, Abreißverhalten und die Griffigkeit / Rutschfestigkeit.

Zur Gewährung einer ausreichenden Haftfestigkeit auf Temperatur-Wechsel-Verträglichkeit ist die Prüfung der Temperaturwechselbeanspruchung nach [DIN EN 13687-1] und [DIN EN 13687-2] durchzuführen. Es dürfen dabei keine Blasen, Risse oder Abblätterungen entstehen. Im Abreißversuch sind für beschichtete, befahrene („unter Verkehrslast“) Systeme Haftfestigkeiten von 1,5 N/mm<sup>2</sup> (rissüberbrückende, flexible Systeme) bzw. 2,0 N/mm<sup>2</sup> (starre Systeme) nachzuweisen ([DAfStb - 2001], [DIN EN 1504-2], [DAfStb - 2016]).

Die Oberflächenzugfestigkeiten von beschichteten Probekörpern müssen im Abreißversuch nach [DIN EN 1542] nachgewiesen werden. Die Anforderungen

hinsichtlich der Mindestwerte der Oberflächenzugfestigkeiten stimmen mit den vorgenannten Haftfestigkeiten überein [DAfStb - 2001].

Der Nachweis der Griffbarkeit bzw. Rutschfestigkeit erfolgt nach [DIN EN 13036-4]. Oberflächenschutzsysteme müssen dabei die Anforderungen der Klasse III, d. h. mindestens 55 Skalenteile beim Nachweis Griffbarkeit im nassen Zustand, erfüllen.

Zusätzlich müssen bei rissüberbrückenden Systemen die Anforderungen bzgl. der Rissüberbrückungsfähigkeit nach [DIN EN 1062-7] erfüllt werden.

### 2.4.4 Anwendungsregeln

Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit befahrener Parkdecks über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren werden in [DAfStb Heft 525 - 2010] die Prinzipien genannt und im DBV Merkblatt „Parkhäuser und Tiefgaragen“ die entsprechenden Anwendungsregeln aufgeführt ([DBV - 2018]). Hierbei ist zwischen drei verschiedenen Ausführungsvarianten (A, B oder C, Tab. 2.2) zu wählen [DBV - 2018]. Alle Ausführungsvarianten haben das Verhindern des Eindringens bzw. Transportes von Chloriden bzw. chloridhaltigen Wässern über Risse und Fugen zur Bewehrung zum Ziel. Unabhängig von der gewählten Ausführungsvariante ist ein Instandhaltungsplan notwendig. Die Ausführungsvariante ist im Wesentlichen vom gewählten Entwurfsgrundsatz und damit von der Rissbeherrschung abhängig. Als Entwurfsgrundsatz ist zwischen einer rissvermeidenden Bauweise (Entwurfsgrundsatz a), einer Rissverteilung (Entwurfsgrundsatz b) oder einer Rissbildung mit planmäßiger nachträglicher Rissbehandlung (Entwurfsgrundsatz c) zu unterscheiden. Bei Variante A ist kein flächiges Oberflächenschutzsystem und keine flächige Abdichtung vorgesehen, da entweder rissvermeidend geplant und gebaut wird oder ein lokaler Schutz der Risse und Fugen erfolgt. Mit einem flächigen Oberflächenschutzsystem wird bei Variante B beschichtet. Die Applikation einer flächigen, rissüberbrückenden Abdichtung und Schutzschicht erfolgt bei Variante C. In Abhängigkeit von der gewählten Ausführungsvariante ergeben sich die Anforderungen an die Expositions- und Feuchteklassen sowie die Mindestbetondeckungen. Wenngleich die flächigen Beschichtungen der Varianten B und C das Eindringen von Chloriden verhindern, ist eine Reduktion der Mindestbetondeckungen nach dem aktuellen Merkblatt nur noch bei Variante C („schwarze Variante“) zulässig. Aufgrund der geringeren Lebensdauer von Variante B sind hier höhere Anforderungen an den Beton gestellt. Die Lebensdauer einer flächigen („schwarzen“) Abdichtung entspricht i. d. R. der Lebensdauer der Konstruktion. Der deutlich höhere Aufbau ist für die spätere Nutzung und bei den Baukosten zu berücksichtigen ([Bastert u. Kilz - 2013], [Bastert - 2014]). Nach einer jährlichen Wartung in den ersten fünf Jahren, wird für Varianten A und C ein jährliches bzw. zweijährliches Wartungsintervall empfohlen. Bei der wartungsintensiven (jährlichen) Variante B werden mehrmalige Erneuerungen während der Nutzungsdauer nötig sein und das Oberflächenschutzsystem ist bei der Wartung auf Risse, Fehlstellen und Verschleiß zu überprüfen ([Curbach et al. - 2004], [Bastert u. Kilz - 2013], [Bastert - 2014]), sodass Chloride nicht bis zur Bewehrung vordringen können.

Trotz sorgfältiger Planung einer rissbeschränkenden Bauweise können oftmals trotzdem breitere Risse entstehen [Jung et al. - 2005]. Die technisch sinnvollste



Lösung bietet nach [Flohrer - 2018] Entwurfsgrundsatz c bei dem ein starres Oberflächenschutzsystem vollflächig appliziert wird (Variante B1) oder ein lokaler Schutz der Risse und Fugen, der bspw. über Rissbandagen erfolgt (Variante A2), wenn gleichzeitig das Instandsetzungskonzept entsprechend umgesetzt wird. Eine intensivere Wartung in den ersten Jahren nach Errichtung ist sinnvoll, da in dieser Zeit nicht nur temperaturbedingte, sondern auch austrocknungsbedingte, also „planmäßige“ Risse entstehen und vorhandene sich (weiter) öffnen können. Zu weiteren beeinflussenden Faktoren zählen drückendes Grundwasser, die Nutzungsfrequenz, lokal höher beanspruchte Bauteile / Bereiche wie Rampen und Kurven sowie optische Ansprüche an das Bauwerk [Wolff - 2010], die auch weitere Varianten ermöglichen. Bezüglich ihrer Robustheit vergleicht [Flohrer - 2013] die verschiedenen Ausführungsvarianten. Sowohl die rissvermeidende Bauweise als auch die schwarze Variante C schneiden dabei am besten ab. Für Oberflächenschutzsysteme, Variante B, gibt es deutlich höhere Anforderungen bzgl. der Wartung, da sie weniger verschleißbeständig sind, welche jedoch aufgrund ihrer Aufbauhöhen und geringeren Lasten ihre Vorteile gegenüber Variante C aufweisen. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Oberflächenschutzsystemen, die Variante B zugeordnet werden.

Tab. 2.2: Ausführungsvarianten für Parkdecks nach [DBV - 2018]

	1	2	3	4	5	6	7
1	Variante	Variante A		Variante B		Variante C	
2	Beschreibung	ohne flächiges Oberflächenschutzsystem oder ohne Abdichtung (jedoch mit besonderer Maßnahme bei Rissen und Fugen)			mit flächigem Oberflächenschutzsystem <sup>d)</sup>		mit flächiger, rissüberbrückender Abdichtung und Schutzschicht <sup>d)</sup>
3	Unter-variante	A1	A2	B1	B2	C1	C2
		riss-vermeidende Bauweise	lokaler Schutz der Risse und Fugen <sup>b)</sup> (z. B. rissüberbrückende Bandage)	vollflächig starr beschichtet: OS 8 mit begleitender Rissbehandlung <sup>b)</sup> (z. B. rissüberbrückende Bandage)	vollflächig rissüberbrückend beschichtet: OS 10 mit Nuttschicht  oder OS 11	OS 10 oder unterlauf-sichere <sup>c)</sup> bahnenförmige Abdichtung, jeweils mit Dichtungs- und Schutzschicht aus Gussasphalt	unterlauf-sichere <sup>c)</sup> zweilagige bahnenförmige Abdichtung mit Schutzschicht
4	Entwurfsgrundsatz	a	c	c	b	a, b	a, b
5	Expositions- und Feuchtigkeitsklasse	XD3, XC4, WA (ggf. XF2 oder XF4)		XD1, XC3, WF (ggf. XF1)		XC3, WF (ggf. XF1)	
6	Mindestbetondeckung $c_{min}$	Betonstahl 40 mm Spannstahl 50 mm		Betonstahl 40 mm Spannstahl 50 mm		Betonstahl 20 mm Spannstahl 30 mm	
7	Inspektion <sup>a)</sup>	jährlich in den ersten 5 Jahren, danach mindestens:					
		alle 2 Jahre	jährlich	jährlich	jährlich	alle 2 Jahre	alle 2 Jahre

<sup>a)</sup>Für alle Varianten ist ein Instandhaltungsplan im Sinne der DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen [R1] erforderlich.

<sup>b)</sup>Planung und Ausführung des dauerhaften lokalen Schutzes von Rissen und Fugen nach der DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen [R1].

<sup>c)</sup>Voraussetzung für die Unterlauf-sichere einer direkt auf den Betonuntergrund aufgetragenen Abdichtungsschicht ist eine vollflächige, dauerhaft kraftschlüssige Verbindung zur Betonunterlage. Der Betonuntergrund ist dazu vor Aufbringen der Abdichtungsbahn durch Kugelstrahlen vorzubereiten und mit Epoxidharz zu behandeln (Verfahren und Stoffe nach ZTV ING [R60], Teil 7, Abschnitt 1:2003-01, Abschnitt 2:2010-04, Abschnitt 3:2003-01).

<sup>d)</sup>Alternative Produkte oder Bauarten sind möglich, wenn deren Gleichwertigkeit mit den Oberflächenschutzsystemen der Abdichtungen nachgewiesen wird.

Anmerkung: Sobald die in Vorbereitung befindliche DAfStb-Instandhaltungs-Richtlinie bauaufsichtlich eingeführt ist, ist diese als Grundlage der Planung, Ausschreibung und Ausführung von Oberflächenschutzsystemen zu verwenden.

## **2.5 Parameter für die Verschleißbeständigkeit**

### **2.5.1 Allgemeines**

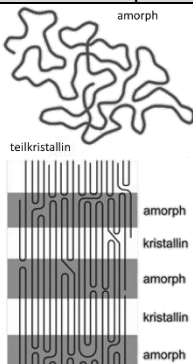
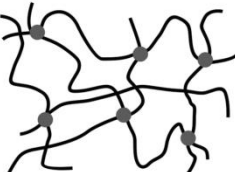
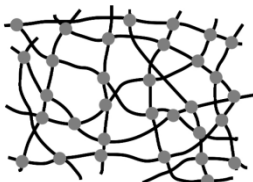
Neben der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen spielt auch die Dauerhaftigkeit der Beschichtungssysteme eine wesentliche Rolle, um über die funktionelle Lebensdauer eine Aussage treffen zu können. Die Dauerhaftigkeit der Beschichtungen ist dabei von mehreren äußeren Einflüssen abhängig, die auf sie einwirken. Dazu zählen u. a. Frost, Sonnenbestrahlung und Regenereignisse, die vor allem auf Freidecks zu höheren Beanspruchungen führen. Zu den materialbedingten Parametern zählen weiterhin die Untergrundhaftung und die Alterung der Kunststoffe selbst (ohne Einfluss von UV-Strahlung). Unabhängig von den stofflichen Eigenschaften des Polymers spielen vor allem die Beanspruchungsart im Parkbau (Fußgänger, PKW) und die Beanspruchungsdauer / Häufigkeit eine bedeutende Rolle. Die mechanische Widerstandsfähigkeit ist abhängig von der Schichtdicke und Polymerart sowie den Aushärte- und Umgebungstemperaturen. Die innere Struktur der vorgenannten Polymerklassen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verschleißigenschaften. Der Verschleiß (Abrieb) von Beschichtungssystemen kann mit verschiedenen Verfahren bestimmt werden (Abschnitte 3.5 und 3.6), während ein Vergleich zu realen Bauteilbeanspruchungen nicht gegeben ist [Engelfried u. Eisenkrein - 2012]. Alle vorgenannten Einflüsse sind in der Praxis z. T. nur schwer voneinander trennbar. Nachfolgend werden die material- und nutzungsbedingten Parameter für die Verschleißbeständigkeit kurz erörtert sowie der chemische Aufbau von Oberflächenschutzsystemen erläutert.

### **2.5.2 Chemischer Aufbau von Oberflächenschutzsystemen**

#### **2.5.2.1 Allgemeines**

Oberflächenschutzsysteme, die der Variante B zugeordnet werden können, bestehen aus Kunstharzen, die in drei Gruppen klassifiziert werden: Duroplaste, Elastomere und Thermoplaste. Die Unterscheidung erfolgt aufgrund des Vernetzungsgrades zwischen den makromolekularen Hauptketten bzw. der Anordnung der linearen und verzweigten Moleküle (Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Einteilung und grundlegende Eigenschaften von Kunststoffen aus [Bargel - 2005] und [Domininghaus et al. - 2008]

Thermoplaste	Elastomere	Duroplaste
		
Zusammenhalt		
unvernetzt linear bis verzweigt	schwach vernetzt (weitmaschig) chemisch vernetzt	stark vernetzt (engmaschig) chemisch vernetzt
Eigenschaften		
schmelzbar löslich	nicht schmelzbar nicht löslich	nicht schmelzbar nicht löslich
plastisch formbar i. A. großer E-Modul recyclebar	gummielastisch kleiner E-Modul	nicht plastisch formbar großer E-Modul

Duroplaste (z. B. Epoxidharze, Polyurethane) sind Kunststoffe mit dem höchsten Vernetzungsgrad (Raumnetz), die nach der Herstellung nicht mehr verformbar und über ihre Hauptvalenzbindungen dreidimensional fest vernetzt sind. Die Herstellung dieser industriellen Kunststoffe erfolgt über Polyaddition oder Polykondensation. Bei der Polyaddition vernetzen sich trifunktionelle Monomere untereinander und bilden Polymerketten. Durch die Zugabe von Katalysatoren kann bei Raumtemperatur die Vernetzung initiiert werden, oft unter Bildung von Wasser oder  $HCl$  (Polykondensation). Alternativ erfolgt die Aktivierung bei hohen Temperaturen thermisch. Duroplaste besitzen eine glasartige, harte (spröde) Konsistenz. Verantwortlich dafür ist die engmaschige dreidimensionale Vernetzung der ursprünglich vorhandenen linearen Polymerketten. Darüber hinaus zeigen sie kein energie-elastisches Verhalten und sind nicht schmelzbar.

Elastomere verfügen über Kettenmoleküle und punktuelle Vernetzungen. D. h. sie sind weitmaschig vernetzte, nicht schmelzbare Kunststoffe, die sich bei Zug- und Druckbeanspruchung elastisch verformen (bei einer Zugbeanspruchung werden die geknäulten Polymerketten auseinandergezogen). Mit der Entlastung kehren sie wieder in die Ursprungsform (statisch-dynamisches Gleichgewicht) zurück, solange die Verknüpfungen nicht aufgebrochen werden (Abb. 2.12). Es erfolgt somit keine Speicherung der zugeführten Energie. Elastomere können sowohl Hart- als auch Weichgummis sein.

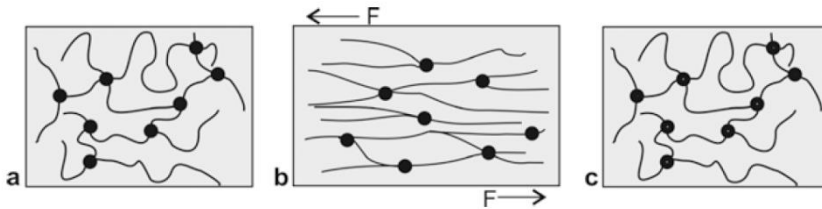


Abb. 2.12: Verhalten von Elastomeren bei Krafteinwirkung: a vor, b während, c nach der Krafteinwirkung aus [Arnold - 2017]

Elastomere und Duroplaste verfügen über keine (teil-)kristallinen (teilweise parallele Anordnung von Molekülketten) Bereiche, sondern sind amorph (ungeordnet). Die Stabilität / Festigkeitseigenschaften werden hier über die Querverbindungen der einzelnen Ketten gebildet. Je mehr dieser Verbindungen vorhanden sind, desto stabiler ist das Gerüst der Polymere und desto schwieriger wird es einzelne Ketten aus diesem Gerüst herauszulösen. Gleichzeitig wird mit der steigenden Anzahl der Vernetzungspunkte die Beweglichkeit der Kettenmoleküle reduziert und die mechanischen Eigenschaften erhöht. Die geringere Vernetzung und damit weitmaschigere Struktur der Elastomere bewirkt die niedrigeren Festigkeitseigenschaften gegenüber den Duroplasten ([Eyerer et al. - 2008], [Rösler et al. - 2016]).

Thermoplaste (z. B. Polymethylmethacrylate) weisen keinerlei Verknüpfungen auf, sodass diese nur aus Ketten- oder Fadenmolekülen bestehen. Diese können sowohl amorph als auch teilkristallin vorliegen und sind daher nahezu unvernetzt. Aufgrund der schwachen Anziehungskräfte zwischen den Polymerketten können sie aufgeschmolzen werden. Mit einer dichteren Packung nimmt ebenfalls die Dichte und die Festigkeit des Polymers zu. Vor allem die teilkristallinen Bereiche der Thermoplaste bestimmen die Festigkeitseigenschaften. Die nichtkristallinen Bereiche führen zu Fehlstellen im Molekülverbund und wirken dadurch wie Abstandhalter, sodass die Bildung einer dichteren kristallinen Packung verhindert wird. Thermoplaste zeichnen sich dahingehend aus, dass sie innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs verformbar sind. Dieser Vorgang ist beliebig oft wiederholbar, sofern das Polymer nicht durch eine Überhitzung zerstört wird. Während heute Thermoplaste im Extrusionsverfahren verarbeitet werden, wurden sie früher üblicherweise im Spritzgießverfahren hergestellt.

Die Eigenschaften von Oberflächenschutzsystemen werden maßgeblich durch deren Zusammensetzung beeinflusst. Mit der Art und Menge der einzelnen Komponenten (Harz, Härter, Zusatzstoffe und Füllstoffe) werden die Eigenschaften wie Härtungsgeschwindigkeit, chemische Stabilität sowie Viskosität beeinflusst. Dies hat nicht nur Einfluss auf die Verarbeitung und Aushärtung, sondern auch auf mechanische, chemische und physikalische Eigenschaften des fertig applizierten Systems [Littmann - 2013]. Polyurethane, Epoxidharze und Polymethylmethacrylate sind die am häufigsten eingesetzten Kunststoffe bei Oberflächenschutzsystemen und werden nachfolgend kurz erläutert.

### 2.5.2.2 Polyurethan (PUR)

Polyurethane entstehen über eine Polyadditionsreaktion, bei der monomere Moleküle, mit jeweils mindestens zwei funktionellen Gruppen, ohne Abspaltung von Nebenprodukten, miteinander verbunden werden. Bei der Reaktion entsteht eine Urethanbindung, die folgende Struktur hat:  $-NH-CO-O-$  (Abb. 2.13).

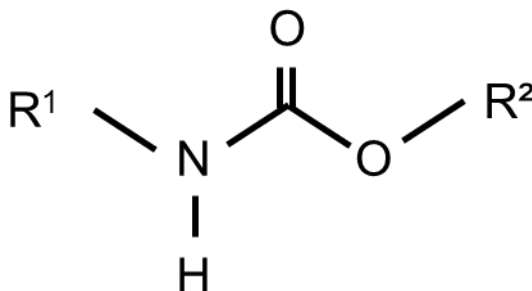


Abb. 2.13: Strukturformel Polyurethan

In Abhängigkeit vom Herstellungsprozess und den verwendeten Ausgangskomponenten (bi- und trifunktionale Monomere) entstehen sowohl lineare als auch vernetzte Moleküle. Dies führt dazu, dass Polyurethane sehr vielfältige Eigenschaften aufweisen können. Sie können als Duroplaste, Elastomere, aber auch als Thermoplaste mit ihren jeweiligen Eigenschaften hergestellt werden und somit sowohl hartes bzw. sprödes als auch elastisches Materialverhalten aufweisen.

Ein Vorteil dieser Kunststoffe ist, dass sie vergleichsweise wenig altern, auf diversen Untergründen gut haften und über hohe Verschleißfestigkeiten verfügen. Sie sind nahezu resistent gegenüber den meisten Chemikalien, Lösemitteln (verdünnt) und Witterungseinflüssen. Weiterhin können Polyurethane durch Zugabe von kleinen Wassermengen bei der Reaktionsmischung als Weichschäume hergestellt werden. Bei Hartschäumen werden Pentane, Methylenchlorid oder reines Kohlendioxid als Treibmittel hinzugefügt.

Die Dichte von ungeschäumten Polyurethanen liegt zwischen 1.000 und 1.250 kg/m<sup>3</sup>, bei weichem Blockschaum zwischen 5 und 40 kg/m<sup>3</sup> und bei hartem zwischen 30 und 90 kg/m<sup>3</sup>. Im Bauwesen werden Polyurethane vorwiegend als 1- oder 2-Komponenten-Schäume verwendet.

### 2.5.2.3 Epoxidharz (EP)

Epoxidharze gehören ebenfalls zu den Kunststoffen, die durch Polyaddition hergestellt werden. Sie zählen zu den Duroplasten. Die charakteristische Strukturformel der Epoxide besteht aus einem Sauerstoffatom, das zyklisch mit zwei  $CH_2$ -Gruppen verbunden ist (Abb. 2.14).

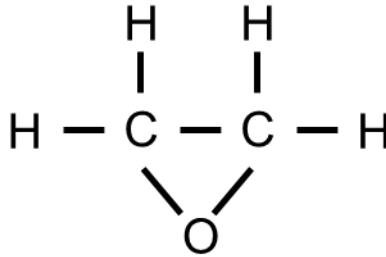


Abb. 2.14: Strukturformel Epoxidharze

Die ausgehärteten klaren Epoxidharze sind harte, abriebfeste und schwindarme, aber auch chemisch- und temperaturbeständige Kunststoffe. Sie haften ebenfalls sehr gut auf verschiedenen Untergründen. Aufgrund der unterschiedlichen Arten und Mengen von Ausgangs- und Füllstoffen, dem Vernetzungsgrad und dem Verarbeitungsverfahren können unterschiedliche spezifische physikalisch-chemische Eigenschaften ausgebildet werden. Die hohen Festigkeiten begünstigen daher z. T. ein zähes und steifes Materialverhalten. Die Dichte von reinen Epoxidharzen liegt zwischen 1.170 und 1.250 kg/m<sup>3</sup>. Durch Zugabe von Füllstoffen (mineralische oder Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern) kann die Dichte in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt zwischen 1.700 und 2.100 kg/m<sup>3</sup> variieren. Das Elastizitätsmodul beträgt zwischen 3.000 und 4.500 N/mm<sup>2</sup> bei einer Zugfestigkeit von etwa 80 N/mm<sup>2</sup>.

#### 2.5.2.4 Polymethylmethacrylat (PMMA)

Polymethylmethacrylate gehören zu den Thermoplasten und entstehen durch Polymerisation des monomeren Methacrylsäuremethylesters. Die charakteristische Summenformel lautet  $(\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8)_n$  (Abb. 2.15).

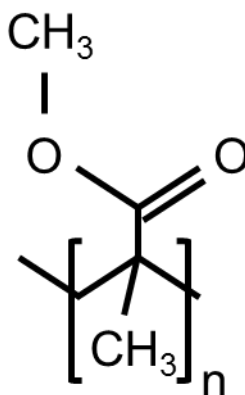


Abb. 2.15: Strukturformel Polymethylmethacrylat (PMMA)

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von PMMA sind abhängig vom Herstellprozess (Druck, Dauer und Temperaturverlauf bei der Polymerisation) und der

entstehenden mittleren Länge der Polymerkette sowie der Vernetzung der Polymerketten untereinander. Dieser transparente, amorphe Kunststoff ist umgangssprachlich unter dem Namen Acrylglas oder dem Handelsnamen Plexiglas® bekannt und hat eine Dichte von  $1.180 \text{ kg/m}^3$ . Polymethylmethacrylate sind witterungs- und relativ alterungsbeständig, lassen jedoch UV-Licht durch. Weiterhin sind sie elastisch, kratzfest und bedingt schlagfest. Im erhärteten Zustand lassen sie sich aufgrund ihrer hohen Festigkeiten gut mechanisch bearbeiten. Aufgrund ihrer thermoplastischen Eigenschaften können sie auch bei Temperaturen von ca.  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  leicht verformt werden und behalten ihre neue Form nach der Abkühlung bei. Polymethylmethacrylate sind beständig gegenüber Säuren und Laugen in verdünnter Konzentration sowie Benzin und Ölen. Das Elastizitätsmodul von Polymethylmethacrylaten beträgt  $2.700$  bis  $3.200 \text{ N/mm}^2$ .

### 2.5.3 Materialbedingte Parameter

Thermoplaste, wie Polymethylmethacrylate, sind elastische Kunststoffe mit gleichzeitig hohen Festigkeiten, wodurch sie abriebfester als Duroplaste (Epoxidharze und Polyurethane) sind. Zur Verbesserung der polymeren Eigenschaften, können Füllstoffe hinzugegeben werden. Es ist dabei zwischen Funktionszusatzstoffen (Verarbeitungshilfsmittel, Modifikatoren), Füllstoffen und Pigmenten (Hochleistungsadditiv) sowie Verstärkungsstoffen (Eigenschaftsverbesserer) zu unterscheiden [Eyerer et al. - 2008]. In [Czichos u. Habig - 2015] werden Füllstoffe (Verstärkungsfüllstoffe) aufgeführt, die die thermische Leitfähigkeit erhöhen, die Reibung erniedrigen oder den Verschleißwiderstand erhöhen (Tab. 2.4).

Tab. 2.4: Füllstoffe für polymere Werkstoffe zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens aus [Czichos u. Habig - 2015]

Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit	Erhöhung des Verschleißwiderstands	Erniedrigung der Reibung
Cu-Sn-Legierungen Silber Granit	Glas Grafit Glimmer Metall und Metalloxide Keramik Textilfasern (Asbest) <sup>a</sup>	Grafit Molybdänsulfid Polytetrafluorethylen
<sup>a</sup> wegen der Gesundheitsschädlichkeit nicht mehr zu verwenden		

Die Zugabe von Quarzsand, Korund oder Splitt als Füllstoffe, wie es in Parkbauten zur Erhöhung des Verschleißwiderstands (und zum Erreichen der Griffigkeit) üblich ist, fehlen in obiger Aufzählung. Eine Steigerung des Verschleißwiderstands kann nur gewährleistet werden, wenn das Füllkorn gut eingebunden und das Größtkorn des Füllkorns an die Schichtdicke angepasst ist [Raupach - 2005]. Weiterhin müssen Beschichtungssysteme „eine tiefenunabhängige Verschleißfestigkeit“ aufweisen [Engelfried u. Eisenkrein - 2012]. Es ist daher ratsam, wenn stärker frequentierte Bereiche über einen dickeren Schichtaufbau verfügen.



Die Festigkeitseigenschaften und damit auch das Verschleißverhalten werden bestimmt vom Aufbau und der Kettenlänge der Moleküle. Mit Abnahme der Festigkeit wird die Verschleißneigung erhöht. Die mechanischen Eigenschaften sind maßgeblich abhängig von der Beweglichkeit der Kettenmoleküle, die von der chemischen Struktur beeinflusst wird. Die Beweglichkeit des Gesamtgefüges ist zusätzlich abhängig von der Temperatur (Abb. 2.16). Der Verlauf des Elastizitätsmoduls ist dem der Festigkeit gleichgestellt, sodass statt des Elastizitätsmoduls auch die Spannung bei konstanter Dehnung oder die Viskosität aufgetragen werden können ([Gieler u. Dimmig-Osburg - 2006], [Eyerer et al. - 2008]). Durch Erhöhung der Temperatur wird dem Kunststoff kinetische Energie hinzugefügt, sodass sich die einzelnen Teilchen vermehrt in Bewegung setzen und der Zustand des Materials verändert werden kann. Die Formbeständigkeit kann anhand der Glasübergangstemperatur bestimmt werden. Mit Erreichen der Glasübergangstemperatur werden aus spröden Kunststoffen gummielastische. Dies gilt jedoch nur für die amorphen Bereiche des Kunststoffs. Kristalline Materialien verfügen über eine Schmelztemperatur. Bei teilkristallinen Materialien gibt es sowohl eine Glasübergangstemperatur als auch eine Schmelztemperatur, sodass beim Erwärmen zunächst die Glasübergangstemperatur und anschließend die Schmelztemperatur erreicht wird [Rösler et al. - 2016].

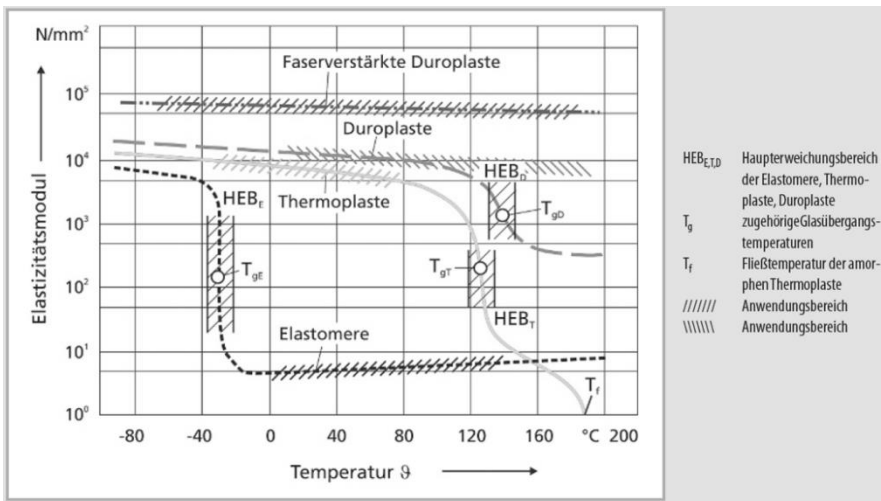


Abb. 2.16: Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls (E-Moduls) von Kunststoffen aus [Eyerer et al. - 2008]

Elastomere weisen bereits bei  $0$   $^{\circ}\text{C}$ , also bei üblichen Gebrauchstemperaturen, ein sehr niedriges Elastizitätsmodul (Abb. 2.16) auf, sodass sie einer Verschleißbeanspruchung nicht widerstehen könnten. Als Beschichtungsmaterialien kommen daher nur Duroplaste und Thermoplaste in Frage. Beide weisen ähnliche Elastizitätsmodule bzw. Festigkeiten auf, jedoch können Thermoplaste auch bei Minustemperaturen noch gut eingesetzt werden, ohne dass sie ihre Eigenschaften ändern. Dies erklärt auch den Einsatz (Eignung) von Polymethylmethacrylaten bei höher beanspruchten Parkbauten mit häufigeren Umschlagszahlen.

Die Alterung von polymeren Beschichtungen kann dazu führen, dass die Schichtdicke abgebaut wird oder eine Versprödung des Beschichtungssystems stattfindet. Ferner

kann die Adhäsion zwischen der Grundierung und dem Untergrund aufgrund physikalischer Wechselwirkungen abnehmen [Wolff u. Raupach - 2008]. Die Alterung der Polymere wird in den Schichtdicken berücksichtigt. Hierfür werden Mindest-, Maximal- und Schichtdickenzuschläge für jedes Oberflächenschutzsystem vorgeschrieben [DAfStb - 2001].

Das Ziel von Oberflächenschutzsystemen ist es Parkbauten, bzw. die befahrenen Oberflächen, vor dem Angriff durch mechanischen Verschleiß (Berücksichtigung der Expositionsklasse: XM erst ab einer Gesamtlast von 30 kN), Karbonatisierung (XC) und Chloride (XD) zu bewahren. Die Lebensdauer der Beschichtungssysteme kann im Rahmen der maximal zulässigen Schichtdicken verlängert werden. Diese weisen durch ein niedriges Elastizitätsmodul auch eine entsprechende Dehnungsfähigkeit auf, um Risse überbrücken zu können. Bei Unterschreitung der Mindestschichtdicken verringert sich ebenfalls die Rissüberbrückungsfähigkeit und die Funktionalität ist nur noch z. T. gegeben. Das System kann anschließend nicht mehr die gleichen Eigenschaften aufweisen wie sie in der Grund- und Erstprüfung ermittelt wurden. Die Versuchsergebnisse von Rieche aus den 1970er Jahren zeigen deutlich wie sich die überbrückbaren Rissbreiten infolge geringerer Schichtdicken reduzieren bzw. miteinander korrelieren ([Rieche - 1979], Abb. 2.17).

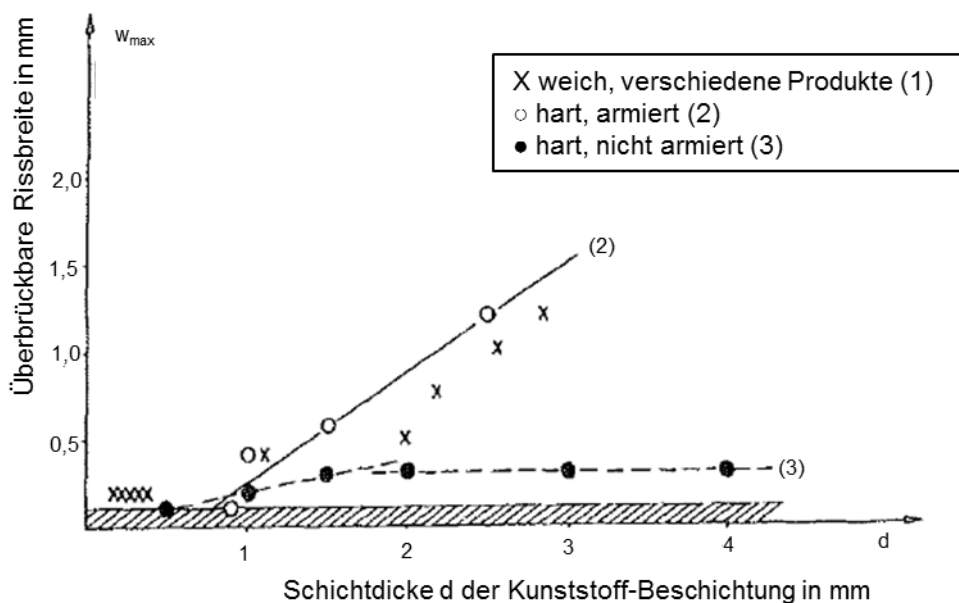


Abb. 2.17: Einfluss der Schichtdicke auf die überbrückbare Rissbreite aus [Rieche - 1979]

[Littmann u. Pleyers - 2004] unterscheiden drei Typen von chemischen Belastungen bzw. Angriffen, die in einem Parkbau wirken und die Dauerhaftigkeit der Beschichtungssysteme beeinträchtigen: lösende / quellende Angriffe, saurer und basischer Angriff. Beim lösenden / quellenden Angriff dringen Lösemittelmoleküle (hier reicht ggf. Wasser) in „gering oder nicht vernetzte Polymere oder solche, deren

Verknüpfung auf Nebenvalenzkräften beruhen“ ein und führen zu einer Volumenvergrößerung. Oftmals geht ein chemischer Angriff einem mechanischen Angriff voraus, dieser wird jedoch nicht erkannt oder unterschätzt. Zu den lösenden und quellenden Angriffen zählen auch Wasser und chloridhaltiges Wasser. Bei niedrig oder nicht chemisch vernetzten Polymeren dringen die Wassermoleküle in das Beschichtungssystem ein und weiten es auf. Dies hat zur Folge, dass sich die mechanischen Eigenschaften verschlechtern. Beim sauren als auch basischen Angriff werden dagegen die vernetzten Polymerketten angegriffen und aufgebrochen, sodass es anschließend zu einem Aufquellen an diesen Stellen kommt. Dies wird vor allem durch den Einsatz von Reinigungsmitteln hervorgerufen. An die Deckversiegelung sind daher hohe Anforderungen zu stellen. Risse oder Fehlstellen in dieser können zu einem Schaden im Beschichtungssystem führen. Als weitere Angriffsart wird die Weichmacherwanderung aus den PKW-Reifen genannt, die zu Verfärbungen führt jedoch von untergeordneter Rolle im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit ist. Kunstharze weisen z. T. ein temperaturabhängiges Materialverhalten auf und können wie vorgenannt auf Feuchtigkeit empfindlich reagieren. Die Anforderungen und Ausführungshinweise der technischen Merkblätter zur Erhöhung der Lebensdauer sollten daher sowohl bei der Verarbeitung als auch bei der Wartung befolgt werden.

#### **2.5.4 Nutzungsbedingte Parameter**

Der Verschleißwiderstand der Beschichtungen ist in der Praxis nur bedingt vergleichbar aufgrund von unterschiedlichen Nutzungsfrequenzen, die auch nur z. T. aufgezeichnet werden [Raupach - 2005]. Starre Epoxidharzsysteme mit einem hohen Füllgrad an Quarzsanden weisen deutlich geringere Verschleißerscheinungen auf. Durch eine zusätzliche Deckversiegelung und ein gröberes Füllkorn kann der Verschleißwiderstand erhöht werden [Breit et al. - 2015a]. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass eine reine Deckversiegelung die Rauigkeit der Oberfläche reduziert und die Rutschsicherheit herabgesetzt wird. Eine andere Möglichkeit der Applikation einer zweiten Deckversiegelung ist es, die erste abzustreuen und diese dann anschließend in einem weiteren Arbeitsgang erneut zu versiegeln. Dies verhindert die vorgenannte Problematik. Die Untersuchungen von [Raupach - 2005] zeigten auch, dass die Schutzwirkung gegenüber Chlorideintrag noch für ca. 5 bis 10 Jahre gegeben ist, nachdem das Beschichtungssystem abgefahren wurde.

Die Frequentierung eines Parkbaus hat einen entscheidenden Einfluss auf den entstehenden Verschleiß in einem bestimmten Zeitraum und den damit verbundenen Instandhaltungskosten. „In Verbindung mit der Robustheit des Oberflächenschutzsystems [...] ergibt sich daraus die Intervalldicke, mit der bestimmte Instandhaltungsarbeiten erforderlich werden“ ([Schubert et al. - 2016], siehe auch [Bastert u. Kilz - 2013]). Rissüberbrückende Oberflächenschutzsysteme (OS 11) werden i. d. R. geringeren Überfahrten / Rotationen als die starren Systeme standhalten. Wenig frequentierte Parkbauten werden deutlich niedrigere Instandhaltungskosten aufweisen, da die Beschichtungssysteme über eine deutlich längere Lebensdauer verfügen. Bei mehr als 100 PKW-Überfahrten pro Tag sollte dies im entsprechenden Instandhaltungsplan berücksichtigt werden ([DAfStb - 2016], [Wolff - 2018a]). Über die Nutzungsfrequenzen von Parkbauten liegen jedoch nur wenige Informationen vor, da in der Vergangenheit zum Großteil nur die Ein- und

Ausfahrten dokumentiert wurden. In neueren Parkbauten ist es bereits möglich über die Auslastung eines jeden Stellplatzes eine Aussage zu treffen. Seitens der Betreiber ist die Herausgabe dieser Zahlen i. d. R. jedoch nicht gewünscht. Für ein großes Parkhaus im Rhein-Main-Gebiet mit über 3.000 Stellplätzen über mehrere Etagen wurden die Nutzungsfrequenzen für die meistfrequentierte Parkebene zur Verfügung gestellt [Erhard - 2018]. An einem durchschnittlichen Wochentag wird dieses Parkhaus von 10.000 bis 15.000 PKWs genutzt. Die Datenerfassung erfolgt über elektronische Sensoren, d. h. von jedem Parkfeld wird kontinuierlich dokumentiert, ob und wie lange es belegt wird. Im Jahr 2016 gab es im Durchschnitt 1.396,2 Umschläge pro Parkfeld auf dieser Ebene. Dies bedeutet bei 307 Tagen, an denen das Parkhaus geöffnet war, 4,55 Umschläge pro Tag bzw. 9,1 Ein- und Ausparkvorgänge pro Tag und Stellfläche. Durchschnittlich parkt ein Besucher für ca. 2 Stunden im Parkhaus, sodass bei den meistfrequentierten Stellplätzen mit 5 bis 6 Umschlägen pro Tag gerechnet werden kann.

Neben der Frequentierung hat die Wahl des Oberflächenschutzsystems für das jeweilige Bauteil einen starken Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit. Eine Zuordnung einzelner Oberflächenschutzsysteme zu einem Bauteil kann nicht pauschal erfolgen. Für jedes Bauteil bzw. auch Bauart stehen mehrere Varianten zur Auswahl, die abhängig von der Rissbeherrschung zu wählen sind. In Tab. 2.5 sind Beispiele von Ausführungsvarianten von chloridbelasteten Neubauteilen nach [Wolff - 2018a] gelistet. In hellgrau sind die Bauteile markiert, die mit polymeren Oberflächenschutzsystemen beschichtet werden können. Mit Ausnahme von frei bewitterten Rampen ist eine Applikation von Oberflächenschutzsystemen auf Stahlbeton bzw. Stahlverbundbauteilen aus Ort- oder Aufbeton möglich. Dies deckt damit auch einen Großteil der Bestandsbauwerke ab und ist eine verbreitete Ausführungsvariante, da es oftmals die „wirtschaftlich und technisch sinnvollste Lösung“ aufgrund geringerer Auftragsstärken und daraus resultierenden zusätzlichen Lasten ist (S. 832, [Meyer - 2005]). Die genannten Beispiele sind jedoch im Anwendungsfall kritisch zu hinterfragen und die Gegebenheiten eines Parkbaus entsprechend zu berücksichtigen, da Nutzungsfrequenzen, geographische Lage, Entwässerungskonzept und Gefälle, Winterdienst und Reinigungsarbeiten nicht oder nur zum Teil berücksichtigt sind.

Tab. 2.5: Beispiele von Ausführungsvarianten von chloridbelasteten Neubauteilen<sup>1)</sup> aus [DBV - 2018]

Bauart Bauteil	Ortbeton: Stahlbeton, Stahlverbund	Fertigteile oder Trapezbleche mit Aufbeton: Stahlbeton, Stahlverbund	Fertigteile: Spannbeton, Stahlverbund
Parkdach	Varianten C1, C2: unterlaufsichere Abdichtung mit mindestens zwei Abdichtungsebenen und Schutzschicht		
Freideck	Varianten A1, B2 (außer OS 11b), C1, C2		
Zwischengeschossdecken	<ul style="list-style-type: none"><li>- Abdichtung nach Varianten C1, C2</li><li>- Oder rissüberbrückend nach Variante B2<sup>2)</sup></li><li>- Oder rissvermeidend nach Variante A1</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Abdichtung nach Varianten C1, C2</li><li>- Oder Varianten A2 bzw. B1 mit Rissbehandlung</li><li>- Oder rissüberbrückend nach Variante B2<sup>2)</sup></li></ul> Jeweils angepasst an die Rissüberbrückungsfähigkeit des OS oder der Abdichtung im Bereich der Elementfugen	<ul style="list-style-type: none"><li>- Variante C1, C2</li><li>- Oder rissvermeidend nach Variante A1 mit besonderer Behandlung der Stoßbereiche</li></ul>
Bodenplatte (tragend oder aussteifend, außer nachfolgende Zeile)	Alle Varianten A, B, C	-	-
WU-Bodenplatte / Rampe in Bkl. 1 (drückendes Wasser mit Trennrissgefahr)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rissvermeidend nach Variante A1</li><li>- Oder mit begleitender Rissbehandlung bei Varianten A2 oder B1<sup>3) 4) 5)</sup></li><li>- Oder in Wasserwechselzone mit max. 2 m Wasserdruck rissüberbrückend nach Variante B2<sup>6)</sup></li></ul>	-	-
Rampen frei bewittert	<ul style="list-style-type: none"><li>- Abdichtung nach Varianten C1, C2</li><li>- Oder rissvermeidend nach Variante A1</li></ul>	Varianten C1, C2 Oder rissvermeidend nach Variante A1 mit besonderer Behandlung der Stoßbereiche	Varianten C1, C2 Oder rissvermeidend nach Variante A1 mit besonderer Behandlung der Stoßbereiche
Rampen nicht frei bewittert	<ul style="list-style-type: none"><li>- Abdichtung nach Varianten C1, C2</li><li>- Oder rissvermeidend nach Variante A1</li><li>- Oder mit begleitender Rissbehandlung bei Varianten A2 oder B1<sup>3)</sup></li></ul>		
Fußnoten siehe [DBV - 2018]			

Bodenplatten und Rampen unterliegen konstruktionsbedingt oftmals höheren Beanspruchungen und sind dadurch schadens- und verschleißanfälliger. Für diese Bauteile sind daher in der weiterführenden Literatur viele Meinungen und Praxiserfahrungen zu finden. Diese Varianten sind in dem DBV-Merkblatt entsprechend berücksichtigt worden. In der Praxis war die Applikation eines starren Oberflächenschutzsystems mit begleitender Rissbehandlung bei Bodenplatten mit anstehendem Grundwasser umstritten. Ungeklärt ist bei dieser Ausführungsvariante, ob es sich hier noch um eine allgemein anerkannte Regel der Technik handelt, da sie sich weder in der Praxis bewährt hat noch wissenschaftlich abgesichert wurde ([Schöppel u. Stenzel - 2012], [Münchner Runde - 2013]). Motzke argumentierte dahingegen, dass die anerkannten Regeln der Technik nicht angewendet werden, da der Parkbau „nicht die Beschaffenheiten aufweist, die ein vergleichbares Bauwerk üblich aufweist und die ein Besteller erwarten kann“ (S. 588, [Motzke - 2012]). Die dafür angesetzten ein bis zweimal jährlich durchzuführenden Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben werden in der Praxis meist nicht richtig umgesetzt. Für die Einhaltung dieser Aufgaben ist der Eigentümer / Nutzer verantwortlich, der i. d. R. das aus der Bauweise resultierende Risiko nicht richtig abschätzen kann. Unbeschichtete Bodenplatten mit Sollrisselementen (EGS c) oder der Einsatz einer Frischbetonverbundfolie in Kombination mit einem rissüberbrückenden Oberflächenschutzsystem können Alternativen bei Tiefgaragen-Bodenplatten im Grundwasser darstellen [Dauberschmidt u. Vestner - 2015]. Bei wasserundurchlässigen Bodenplatten (WU) werden keine rissüberbrückenden Beschichtungssysteme empfohlen, da es zu Ablösungen oder Blasenbildungen führen kann. Stattdessen soll das starre OS 8-System mit vorheriger bzw. begleitender Rissbehandlung angewandt werden. Bei Bodenplatten ohne drückendes Wasser gibt es keine Einschränkungen.

Sowohl bei Zwischendecken als auch bei Freidecks sollte i. d. R. auf rissüberbrückende Beschichtungssysteme zurückgegriffen werden. In Abhängigkeit von der zu erwartenden Rissbreitenänderung und Beanspruchung stehen verschiedene Systeme zur Verfügung. Für Rampen empfiehlt sich aufgrund der hohen Verschleißbeanspruchung die Verwendung eines starren Systems. Rissbildungen sind im Anschlussbereich an die Parkebenen zu erwarten und bei der Planung entsprechend zu berücksichtigen. ([Flohre - 2004], [Bayer u. Ebeling - 2006], [Raupach et al. - 2006], [Wolff - 2010], [Reul - 2011])

Ohne explizite Nutzungsfrequenzen zu nennen, hat [Flohre - 2018] unterschiedliche Nutzungsarten von Parkbauten verschiedenen Beschichtungsarten gegenübergestellt (Tab. 2.6). Starre Systeme (Variante B) sieht er als unkritisch an, ebenso eine Abdichtung (Variante C). Diese Varianten sind für alle Bauteile (Ausnahme WU-Bodenplatte bei der Abdichtung) unabhängig von der Frequentierung des Bauwerks möglich. Rissüberbrückende Beschichtungen sieht er dagegen nur für weniger stark frequentierte Parkbauten und Geschossdecken vor.

Tab. 2.6: Aufgaben der Planung – Einwirkungen aus der Nutzung aus  
[Flohrer - 2018]

	Wohn- anlage	Wohn- gebäude und Einkaufs- markt	Büro- gebäude	Tief- garage / Parkhaus / EKZ	Boden- platte WU	Geschoss- decke
Nutzungs- frequenz	gering	gering / sehr hoch	Mittel	sehr hoch	gering / hoch	gering / hoch
Starre Beschichtung OS 8 + Bandagen	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rissüber- brückende Beschichtung	OS 11b	-	OS 11a	-	-	OS 11b / OS 11a
Abdichtung (Stahlbeton und Gussasphalt)	✓	✓	✓	✓	-	✓

### **3 Tribologische Beanspruchung durch Verschleißprüfverfahren**

#### **3.1 Allgemeines**

Tribologische Beanspruchungen entstehen infolge von Kräften und Relativbewegungen eines festen Körpers durch einen Gegenkörper. Mit der Befahrung durch PKWs unterliegen Oberflächenschutzsysteme einer tribologischen Beanspruchung, die im Wesentlichen durch Verschleiß (Abrieb) des Oberflächenschutzsystems sichtbar werden. Um die Eignung eines Oberflächenschutzsystems hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit beurteilen zu können, sind entsprechende Prüfungen notwendig. Normativ wurden mehrere Prüfverfahren in den Regelwerken [DAfStb - 2001] und [DIN V 18026] festgelegt. Von allen sollte erwartet werden, dass sie die Realität, wie sie am Bauwerk anzutreffen ist, im Labor realitätsnah widerspiegeln. Um das Verschleißverhalten der Systeme jedoch realitätsnah simulieren zu können, ist es unerlässlich das tribologische System genauer zu betrachten.

Verschleiß setzt sich aus Konstruktionsgrößen und Beanspruchungsgrößen zusammen und ist somit als Gesamtsystem zu betrachten [Heinke - 1975]. Zu den Konstruktionsgrößen zählen die Konstruktionsart (starre / rissüberbrückende Oberflächenschutzsysteme auf einem Betonuntergrund), die Werkstoffpaarung und das Schmiermittel. Die Beanspruchungsgrößen können durch Variation der Reibungs- und Gleitgeschwindigkeitsparameter sowie den zeitlichen Verlauf der Normalkraft beeinflusst werden. Verschleißmechanismus und -rate werden durch vorgenannte Größen maßgeblich bestimmt. Der Verschleißprozess wird durch das Ausmaß von Belastung und Geschwindigkeit, chemischer Zusammensetzung und Struktur der Materialien sowie Zusammensetzung und Temperatur des umgebenden Mediums beeinflusst [de Gee - 1972]. Diese Faktoren können sowohl gemeinsam als auch getrennt voneinander ablaufen. Vier verschiedene Arten von Verschleißprüfungen können unterschieden werden, wobei der Versuchsaufwand mit Annäherung zum realen Bauteilzustand zunimmt: Modell-, Bauteil-, Erzeugnis- und Praxisversuch. Für erfolgreiche Bauteil- und Modellversuche müssen nicht nur die Verschleißbeanspruchungen praxisnah sein, sondern auch die Versuchszeiten sind entsprechend realistisch für den Schadensmechanismus zu wählen [Heinke - 1975]. Erfolgsversprechend sind Versuche, bei denen die Verschleißbeanspruchung variierbar ist, die Beanspruchungen dokumentiert sind und sowohl der Größeneinfluss als auch die wesentlichen Konstruktionsmerkmale berücksichtigt werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden daher die Begriffe Reibung und Verschleiß erläutert und anschließend die verschiedenen Prüfverfahren unterschieden nach ihrer Beanspruchungsart (drehend oder stehend rollend) tribologisch betrachtet sowie hinsichtlich der Praxisnähe bewertet. Ebenfalls wird das tribologisch vorliegende System im Parkhaus analysiert.



## **3.2 Tribologische Wirkungsweise**

### **3.2.1 Definition**

Die Tribologie ist ursprünglich eine Lehre aus dem Maschinenbau, die die Reibung (griechisch: tribein, deutsch: reiben, abnutzen) umfasst und seit Mitte des 20. Jahrhunderts folgendermaßen definiert ist:

„Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices“ (S. 7, [Czichos u. Habig - 2015]).

Ins Deutsche übersetzt ist dies „die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren“. Im Ingenieurwesen geht dies mit dem Ziel der Reduzierung von „reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste“ einher. In einem tribologischen System werden alle an einer tribologischen Beanspruchung, welche durch Relativbewegung und Wechselwirkungen zwischen Oberflächen unter Einfluss von Kräften entsteht, beteiligten Komponenten zusammengefasst. Ziel der Tribologie ist es, Einsparungen bei Energie- und Materialeinsatz, Produktion und Instandhaltung zu erreichen. Reibung und Verschleiß sind somit zwei Begriffe, die zusammen betrachtet werden müssen.

In tribologischen Systemen sind daher die einzelnen beteiligten Konstruktionspartner zu betrachten: Es wird dabei zwischen Grund- und Gegenkörper (Fahrbahnoberfläche und Rad) sowie beeinflussenden Zwischenstoffen (Schmierstoffe wie z. B. Abrieb, Schmutz, usw.) und Umgebungsmedien (bei den hier genannten Verfahren: Luft) unterschieden (Abb. 3.1).

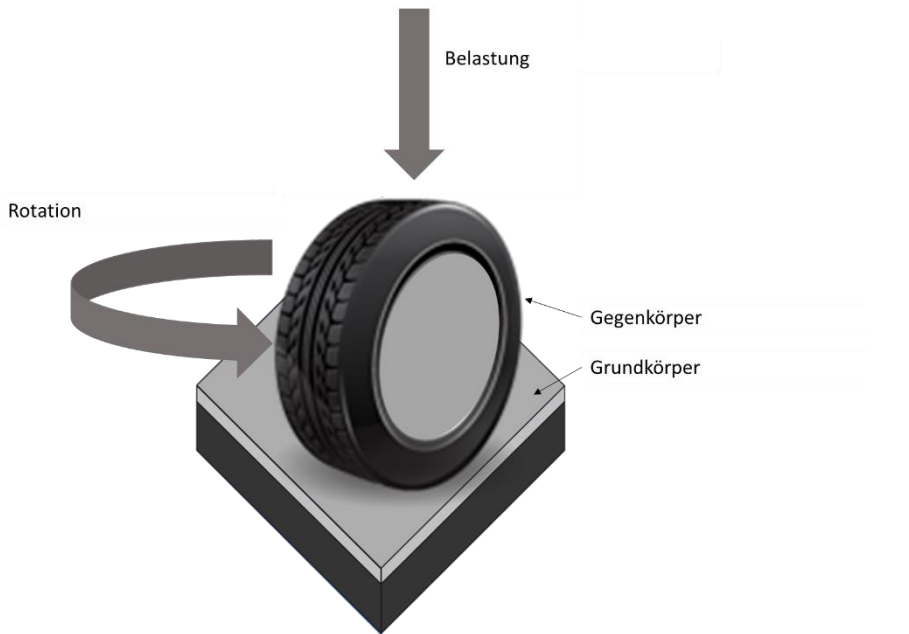


Abb. 3.1: Grund- und Gegenkörper beim Lastfall PKW auf Oberflächenschutzsystem

### 3.2.2 Verschleiß

#### 3.2.2.1 Allgemeines

Verschleiß wird definiert als „Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“ (S. 22, [GfT - 2002]). Dieser ist i. d. R. nicht gewünscht, da er meist eine Wertminderung zur Folge hat.

Die Verschleißentwicklung ist von mehreren Faktoren abhängig. Der Verschleiß wird bei Grund- und Gegenkörper neben der Werkstoffart von Form und Oberflächenbeschaffenheit (rau, glatt) beeinflusst. Bei Vorhandensein eines Zwischenstoffs spielen Art und Teilchengröße dieses Stoffes eine wesentliche Rolle. Die Verschleißstärke ist im Wesentlichen von der Belastungsdauer und -stärke, von der Temperatur und deren zeitlichem Verlauf als auch der Bewegungsart von Grund- und Gegenkörper (z. B. rollend oder stoßend) abhängig. Die umgebende Atmosphäre spielt bei den Prüfverfahren eine untergeordnete Rolle und muss bei den unter Abschnitten 3.5 und 3.6 genannten Prüfverfahren nicht mit betrachtet werden, da diese identisch und konstant ist.

Unterschieden werden beim Verschleiß die Verschleißmechanismen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung (Ermüdung) und tribochemische Reaktion (Tribooxidation). Dies können sowohl physikalische als auch chemische Prozesse sein, die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems ablaufen. Verschiedene Verschleißarten (Gleit-, Wälz-, Stoß-, Schwingungverschleiß) können begrifflich aus

dem Verschleißmechanismus abgeleitet werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit sie nach Art der Bewegung, der tribologischen Beanspruchung oder der Systemstruktur zu klassifizieren. Verschleiß durch Befahrung, wie bei Oberflächenschutzsystemen, geht immer als Abtrag von der Oberfläche aus ([Schwamborn u. Wolff - 2012], [Wolff u. Schwamborn - 2013], [Ladner et al. - 2014a], [Wolff u. Schwamborn - 2017]).

### 3.2.2.2 Verschleißmechanismen

Im Kontaktbereich eines tribologischen Systems können verschiedene Verschleißmechanismen zum Tragen kommen, welche Stoff- und Formänderungen der Kontaktpartner zur Folge hat. Im Kontaktbereich kommt es dabei zu örtlichen und zeitlichen Mikrokontakten. Die Normalkraft  $F_N$  und ggf. der Gleitweg  $s$  (bei Gleitbewegungen) sind die maßgeblichen Faktoren bei der Berührung zweier technischer Oberflächen, welche linear mit der Anzahl an Mikrokontakten zunehmen.

Die vier Verschleißmechanismen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen können vereinfacht in zwei Gruppen unterteilt werden. Bei der Oberflächenzerrüttung und der Abrasion führen „kräftemäßige, spannungsmäßige oder energetische Wechselwirkungen zu Rissvorgängen und Stoffabtrennungen der kontaktierenden Partner“ (S. 132, [Czichos u. Habig - 2015]). Bei der zweiten Gruppe werden durch die Verschleißmechanismen Adhäsion und tribochemische Reaktionen atomare und molekulare Wechselwirkungen beschrieben, die das Resultat chemischer Bindungen im Kontaktbereich zweier Oberflächen sind. Ein Überblick der Verschleißmechanismen in Abhängigkeit ihrer tribologischen Beanspruchung liefert Abb. 3.2.

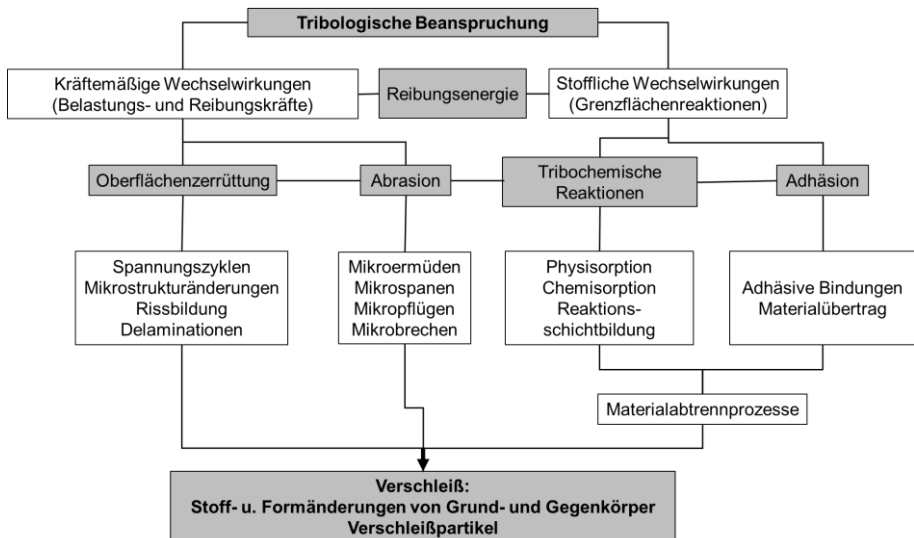


Abb. 3.2: Überblick der Verschleißmechanismen in Abhängigkeit der tribologischen Beanspruchung aus [Czichos u. Habig - 2015]

Die Oberflächenzerrüttung wird hervorgerufen durch Ermüdungserscheinungen (Festigkeitsabnahme) und Rissbildungen an der Oberfläche. Löcher und sog.

Grübchen können entstehen, wenn die entstehenden Mikrorisse wachsen, sich vereinen und Partikel abgetrennt werden. Die Beanspruchung läuft i. d. R. zyklisch bzw. periodisch ab. Die Werkstoffermüdung ist daher abhängig von der Belastungsamplitude und Zyklenanzahl.

Bei der Abrasion erfolgt der Materialabtrag durch ritzende und furchende Beanspruchungen. Eine Abrasion entsteht, wenn der Gegenkörper deutlich härter und rauer ist als der Grundkörper. Der entstehende Materialabtrag wird als Abrieb bezeichnet. Vier verschiedene Abrasionsprozesse werden unterschieden: Mikropflügen, Mikroermüden, Mikrospanen und Mikrobrechen.

Haften die Kontaktflächen von Grund- und Gegenkörper fest aufeinander und es kommt zu einer Relativbewegung, bei der Randschichtteilchen abscheren, so spricht man von Adhäsion. Die entstehenden Löcher und das Haften von Materialteilchen des weicheren auf dem härteren Werkstoff sind das Resultat stofflicher Wechselwirkungen.

Die tribochemische Reaktion unterscheidet sich dahingehend von der Adhäsion, dass sich Zwischenschichten (z. B. Oxidschichten) zwischen Grund- und Gegenkörper aufgrund von Zwischenstoffen oder Umgebungsmedien bilden und diese durch die Bewegung der Körper zerstört werden.

### **3.2.2.3 Verschleißarten**

Der Verschleiß wird in Abhängigkeit der tribotechnischen Anwendung in unterschiedliche Verschleißarten unterschieden. Jeder Verschleißmechanismus kann dabei bei jeder Verschleißart vorkommen.

In Abhängigkeit vom Aggregatzustand und den beteiligten Konstruktionsgrößen werden nach [DIN 50320] die Verschleißarten unterschieden. Bei zwei Festkörpern und ggf. zusätzlichen Partikeln sind die nachfolgend genannten Verschleißarten möglich:

- Gleitverschleiß
- Wälzverschleiß
- Stoßverschleiß
- Schwingungverschleiß
- Furchungverschleiß
- Korngleitverschleiß
- Kornwälzverschleiß

### **3.2.3 Reibung**

Reibung ist als Kraft definiert, die zwischen zwei sich berührenden Körpern (äußere Reibung) oder innerhalb eines Körpers (innere Reibung) wirkt. In Abhängigkeit vom Bewegungszustand werden dabei Haft-, Bewegungs-, Anlauf- und Auslaufreibung unterschieden. Die grundlegenden Reibungsarten, in Abhängigkeit von der Art der Bewegung, werden analog zu den Verschleißarten folgendermaßen definiert: Gleitreibung, Rollreibung, Wälzreibung, Bohrreibung und Stoßreibung.

Die Festkörperreibung (äußere Reibung), oder auch Coulomb'sche Reibung, ist in Haft- und Gleitreibung zu unterscheiden. Haftreibung entsteht bei einem ruhenden und

Gleitreibung bei einem sich bewegenden Gegenstand. Die Reibungskraft  $F_R$  ist in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten  $\mu$  linear zur wirkenden Normalkraft  $F_N$  und wird nach Gleichung (3.1) ermittelt. Der Reibungskoeffizient  $\mu$  ist abhängig von den verwendeten Materialien (Eigenschaften, Oberflächenstruktur, Temperatur, Verschleißkraft, Normalkraft, ...). Prinzipiell gilt, dass die Haftreibung ca. 10 bis 15 % größer ist als die Gleitreibung.

$$F_R = \mu \times F_N \quad (3.1)$$

mit:  $F_R$  Reibungskraft  
 $\mu$  Reibkoeffizient  
 $F_N$  Normalkraft

Die größte wirkende Kraft entsteht beim Übergang von Haftung in Gleiten. Übertragen auf die Situation im Parkbau ist dies beim Anfahren und Bremsen der Fall.

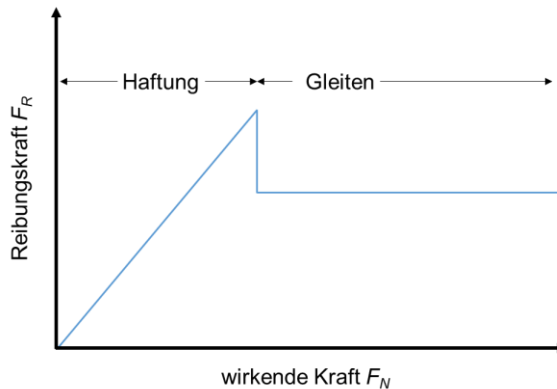


Abb. 3.3: Übergang von Haftung zu Gleiten in Abhängigkeit der wirkenden Kraft  $F_N$  und der Reibungskraft  $F_R$

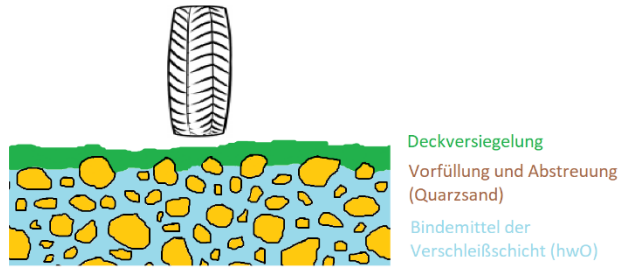
Reibungskoeffizienten können dabei durchaus Werte größer 1 annehmen, da das viskoelastische Materialverhalten von Gummi in Kombination mit einer rauen Oberfläche berücksichtigt werden muss. Zusätzlich ist die Radaufstandsfläche beim PKW-Reifen vom Profil beeinflusst.

### 3.3 Verschleißmodell

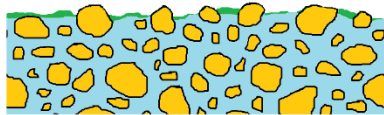
Der Verschleiß von befahrenen Oberflächenschutzsystemen wird im Abtrag der einzelnen Schichten sichtbar. Hierbei kommt es zu Kornausbrüchen der Quarzsandkörner aus der Abstreifung, der Verfüllung der Verschleißschicht und ggf. der Grundierung. Nachfolgend ist in Abb. 3.4 schematisch der Verschleiß an durch PKW-Verkehr beanspruchten Oberflächenschutzsystemen, mit dem Schwerpunkt des Einlaufverschleißes, dargestellt. Der Einlaufverschleiß ist die erste Phase des Verschleißprozesses bei dem mögliche Spannungsspitzen durch die Abrasionsvorgänge abgebaut werden. Nicht dargestellt ist in diesem Modell die zusätzliche Belastung, und damit auch die Beschleunigung des Abriebs der einzelnen

Schichten, durch loses Material (abgefahrenes / ausgebrochene Quarzkörner, Splitt und weitere Materialien, die von außen in das Parkhaus durch PKW-Verkehr mit eingebracht werden) als Zwischenmedium. Zunächst ist der Ausgangszustand dargestellt (Schritt 1). Die Deckversiegelung ist noch vollständig erhalten. Aufgrund von Relativbewegungen und Mikrokontakten zwischen dem Grund- (Oberflächenschutzsystem) und Gegenkörper (PKW-Rad) wird die vergleichsweise „harte“ Deckversiegelung (höhere Festigkeiten des Polymers als in den nachfolgenden Schichten) in hochfrequentierten Bereichen aufgrund mechanisch-thermischer Beanspruchungen abgetragen (Schritt 2). Thermische Beanspruchungen entstehen durch die Reibungstemperatur (am Versuchsstand sowie im Sommer auf dem Freideck durch Sonneneinstrahlung) und führen zu einem Herabsenken der Festigkeiten der Polymere, sodass sich die Quarzkörner leichter lösen können. Zunächst werden dabei die Körner bis zu einem gewissen Punkt freigelegt und sind nicht mehr vollständig von dem Bindemittel umschlossen, bevor sie anschließend „herauswackeln“ und -brechen, sodass z. T. Löcher entstehen. Partiiell werden in diesem Stadium noch Reste der Deckversiegelung vorhanden sein. Werden die Oberflächen weiter beansprucht, wird die Deckversiegelung komplett abgetragen (Schritt 3). Mit zunehmender Beanspruchung, nimmt die Rauheit der Oberfläche ab (Schritt 4), sodass der Einlaufverschleiß abgeschlossen ist und der Verschleiß i. d. R. langsamer voranschreitet.

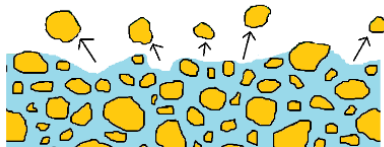
1. Ausgangszustand des Systems



2. Verschleiß der Deckversiegelung



3. Kornausbrüche aus der Verschleißschicht (hwO)



4. fortlaufender Verschleiß und weitere Kornausbrüche

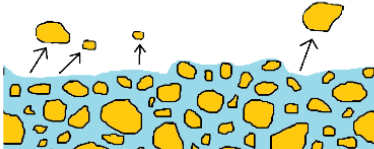


Abb. 3.4: Veranschaulichung des Prinzips der Kornausbrüche am Oberflächenschutzsystem aus [Kleyn - 2018]

In diesem Modell bleiben der Verschleiß durch Risse aufgrund von Spannungen sowie Versagen aufgrund von Alterung und Versprödung der Materialien unberücksichtigt.

### 3.4 Tribologische Betrachtung des Lastfalls PKW auf Oberflächenschutzsystem

Um die Prüfverfahren bzgl. ihrer Eignung analysieren zu können, ist es notwendig die vorherrschende tribologische Beanspruchung zu kennen. Diese wird nachfolgend in Tab. 3.1 aufgezeigt.

Tab. 3.1: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung des Lastfalls PKW auf Oberflächenschutzsystem

Beanspruchungsart	Anfahren, Bremsen, Rotieren von PKW-Rädern
Grundkörper	Oberflächenschutzsystem
Gegenkörper	PKW-Rad
Zwischenmedium	Schmutz, ggf. Korund durch Abstreuerung, ggf. Abrieb des PKW-Rades durch Bremsen / Anfahren sowie Feuchtigkeit und Nässe
Umgebungsmedium	Luft
Radgeschwindigkeit	Geschwindigkeiten bis max. $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$
Überfahrungen	Abhängig von der Frequentierung und Parkbaugröße
Aufstandsfläche	Quadratische Aufstandsfläche mit einer Seitenlänge von 100 mm nach [DIN EN 1991-1-1] ergibt $A = 0,01 \text{ m}^2$
Verschleißart nach [DIN 50320]	Gleitverschleiß Rollverschleiß Korngleit- und Kornwälzverschleiß durch Schmutz, Korund etc.
Mögliche Verschleißmechanismen nach [DIN 50320]	Oberflächenzerrüttung, Abrasion, Adhäsion
Entstehende Kräfte	Klassifikation eines Parkbaus in Nutzungskategorie F nach [DIN EN 1991-1-1]: Fahrzeuggewicht $\leq 30 \text{ kN}$ und einer Achslast von 20 kN Normalkraft: $\max. F_N = \frac{F}{A} = \frac{20 \text{ kN} \times 0,5}{0,01 \text{ m}} = 1.000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ Querkraft: $\max. Q = \mu_G \times F_N = 1,2 \times 1.000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1.200 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Hertz'sche Flächenpressung	$0,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Der Haftreibungswert  $\mu_H$  wird für den Lastfall „PKW-Rad auf Oberflächenschutzsystem“ mit einem Wert von 1,2 angenommen. Dieser wurde für die Interaktion Reifen- / Fahrbahnreibung (Fahrbahn aus Asphaltbeton) ermittelt [Klempau - 2004].

Die Hertz'sche Flächenpressung gibt die größte Spannung an, die in der Berührungsfläche zweier Gegenstände resultiert. Die Oberflächenrauheit der



Oberflächenschutzsysteme wurde nicht berücksichtigt. Dies ist eine weitere Möglichkeit die Prüfverfahren hinsichtlich der realitätsnahen Abbildung des Lastfalls PKW auf Oberflächenschutzsystem zu bewerten.

### **3.5 Drehend, rollende Prüfverfahren für Oberflächenschutzsysteme**

#### **3.5.1 Allgemeines**

Die Prüfverfahren werden in diesem Abschnitt 3.5 sowie dem nachfolgenden Abschnitt 3.6 entsprechend ihrer Beanspruchungsart unterschieden: drehend rollend und stehend rollend.

Drehend, rollende Beanspruchungen können mit den normativ für Oberflächenschutzsysteme zugelassenen Prüfverfahren Taber-Abriebverfahren und BCA-Verfahren bestimmt werden. Mit den weiteren Prüfverfahren (Verschleißwiderstand nach Böhme, Bottroper Rad, Verschleißsimulator für Straßenmarkierungsmaterialien, Driving Abrasion Test) kann ebenfalls Verschleiß durch eine drehend, rollende Bewegung simuliert werden. Diese, wie auch die normativ zugelassenen Prüfverfahren, werden anschließend hinsichtlich ihrer Eignung für die Darstellung des Verschleißverhaltens von Oberflächenschutzsystemen bewertet.

#### **3.5.2 Taber-Abriebverfahren nach DIN EN ISO 5470-1**

Nach [DIN EN ISO 5470-1] wird der Abriebwiderstand von mit Kautschuk oder Kunststoff beschichteten Textilien geprüft (Abb. 3.5). Das Taber-Abriebverfahren besteht aus zwei Reibrädern (1), die auf einer horizontal drehbaren Scheibe – dem Probekörper (2) – stehen. Verwendet werden nach [DIN EN 1504-2] Reibräder des Typs H22 mit einer Last von 1.000 g (9,8 N). Die Drehrichtung des Probekörpers erfolgt gegen den Uhrzeigersinn. Die beiden Reibräder bewegen sich in entgegengesetzter Richtung. Der Abrieb wird an der Abriebzone (3) sichtbar. Während der Prüfung wird das abgeriebene Material per Absaugeinrichtung entfernt (5). Die Anzahl der Überfahrungen (Zyklen) beträgt 1.000 Zyklen.

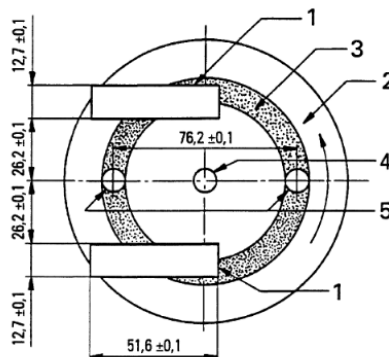


Abb. 3.5: Prüfapparatur für Taber-Abriebverfahren nach [DIN EN ISO 5470-1]

Die Auswertung erfolgt, sofern keine maximale Zyklenanzahl festgelegt wurde, nach der „Farbänderung des abgeriebenen Anteils [...], der Freilegung des Trägermaterials [...], des Gesamtmasseverlusts in Milligramm oder in Prozent der Ausgangsmasse des Probekörpers oder durch Bezugnahme auf die betreffende physikalische Eigenschaft, bestimmt durch die Anwendung eines anerkannten Prüfverfahrens (z. B. [ISO 2286] oder [ISO 5084])“ unter Angabe der geprüften Zyklenanzahl (S. 7, [DIN EN ISO 5470-1]). Für Beschichtungen darf der Masseverlust maximal 3.000 mg betragen [DIN EN 1504-2].

Zu beachten ist der Hinweis in der Norm selbst, dass aufgrund eines fehlenden Ringversuchs über die Präzision keine valide Aussage getroffen werden kann. Es wird nicht empfohlen dieses Verfahren „zur Anwendung in Prüfvorschriften oder bei strittigen Ergebnissen anzuwenden, so lange keine Daten aus Ringversuchen zur Verfügung stehen“ (S. 7, [DIN EN ISO 5470-1]).

### 3.5.3 BCA-Verfahren nach DIN EN 13892-4

[DIN EN 13892-4] beschreibt die Bestimmung des Verschleißwiderstands an Zementestrich- und Kunstharzmörteln. Das BCA-Verfahren (British Cement Association) hat den Vorteil, dass es sowohl im Labor als auch bei bereits verlegtem Estrich anwendbar ist, da sich hier das Prüfgerät und nicht der Probekörper „bewegt“ (Abb. 3.6). Bei diesem Verfahren rotieren drei Stahlräder (Durchmesser 76 mm) mit einer Gesamtauflast von  $(65 \pm 0,5)$  kg auf einem Kreisdurchmesser von  $(225 \pm 1)$  mm auf dem Probekörper. Der Verschleißwiderstand wird an drei Proben bestimmt.

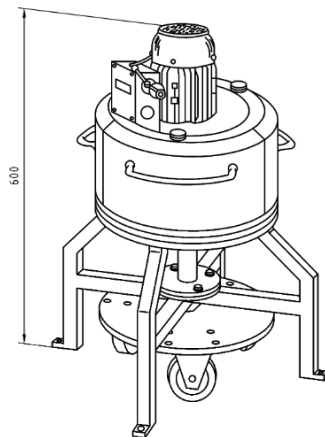


Abb. 3.6: Prüfapparatur für BCA-Verfahren nach [DIN EN 13892-4]

Mit Beendigung des Versuches nach  $(2.850 \pm 10)$  Umdrehungen wird die Verschleißtiefe im ringförmigen Prüfbereich durch Tiefenmessung an acht im Vorfeld definierten Messstellen bestimmt. Die mittlere Abriebtiefe  $AR$ , die auf  $10 \mu\text{m}$  angegeben wird, ergibt sich aus der Differenz der mittleren Tiefe vor und nach der Prüfung.

$$AR = d_w - d_0 \quad (3.2)$$

mit:  $AR$  BCA-Verschleißwiderstand (mittlere Verschleißtiefe in  $\mu\text{m}$ )  
 $d_0$  mittlere Tiefe vor Prüfung aller acht Messstellen  
 $d_w$  mittlere Tiefe nach Prüfung aller acht Messstellen

### 3.5.4 Verschleißwiderstand nach Böhme nach DIN EN 13892-3

Nach [DIN EN 13892-3] wird die Verschleißfestigkeit an Probekörpern von Estrichmörtel und Estrichmassen aus Hartstoffschichten bzw. an Prüfkörpern, die aus verlegtem Estrich geschnitten wurden, bestimmt. Die quadratischen Probekörper mit einer Kantenlänge von 71 mm werden auf einer drehenden, mit Korund abgestreuten Schleifbahn mit 294 N belastet (Abb. 3.7). Die Drehgeschwindigkeit der Schleifscheibe beträgt 30 Umdrehungen pro Minute.

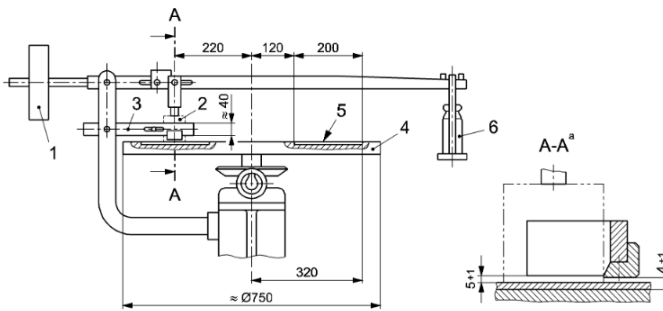


Abb. 3.7: Aufbau der Prüfapparatur zur Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach Böhme nach [DIN EN 13892-3]

In Summe wird jeder Probekörper 352 Umdrehungen (16 Prüfzyklen à 22 Umdrehungen) unterzogen. Die Auswertung erfolgt durch Ermittlung des Volumenverlustes (Messung der mittleren Dicke an neun Messstellen). Angegeben wird dabei ein Verschleißwiderstand  $A$  in  $\text{cm}^3$  pro  $50 \text{ cm}^2$ .

$$A = \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_R} = \Delta l \times 5 \quad (3.3)$$

mit:  $A = \Delta V$  Verschleißwiderstand bzw. Volumenverlust (in  $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$ )  
 $\Delta m$  Massenverringernach 16 Zyklen in g  
 $\rho_R$  Dichte des Probekörpers bzw. der Verschleißschicht in  $\text{g/cm}^3$   
 $\Delta l = l_0 - l_{16m}$  mittlere Verringerung nach 16 Zyklen in mm  
 $l_0$  mittlere Dicke des Prüfkörpers vor der Prüfung an neun Messstellen

$l_{16m}$  mittlere Dicke des Prüfkörpers nach der Prüfung an neun Messstellen

Aufgrund der hohen Prüftemperaturen ist dieses Verfahren für polymere Beschichtungen oder Estriche mit Polymerzusätzen nicht zulässig, da die Glasübergangstemperatur (Übergang vom festen Polymer in einen gummiartigen Zustand) erreicht werden kann.

### **3.5.5 Bottroper Rad**

Die Verschleißprüfmaschine der Firma MC Bauchemie GmbH, Bottrop, wurde in den 1980er Jahren von den Herren Manns, Schneider und Elsässer entworfen ([Manns et al. - 1982], [Huppertz u. Neisecke - 2004]). Ziel dieser Verschleißprüfmaschine war es, die Beanspruchungen von Estrichbauteilen durch Flurförderfahrzeuge simulieren zu können. Dieses Prüfverfahren wurde als Bestandteil der Zulassungsgrundsätze für LAU-Anlagen (Lagern, Abfüllen, Umschlagen) herangezogen.

Auf einem Drehteller (Stahlplatte), mit einem Innendurchmesser von 1.000 mm und Außendurchmesser von 1.800 mm, wird zunächst ein schwindarmes, estrichähnliches Betonersatzsystem aufgebracht, bevor anschließend das Beschichtungssystem appliziert wird. Der Probekörper kann bei Bedarf in drei Ringe unterschiedlicher Durchmesser aufgeteilt werden. Die maximal mögliche zu beschichtende Breite beträgt 390 mm. Die Räder dürfen eine maximale Breite von 200 mm aufweisen. Bei den Prüfungen kommen Vulkollan- und Polyamidräder mit einem Durchmesser von 125 mm und einer Breite von 40 mm zum Einsatz. Mittels Druckluft wird ein Zylinder bei Vulkollanrädern mit 2 kN und bei Polyamidrädern mit 5 kN belastet. Die Vulkollanräder bewirken eine „rollende und stark reibende Belastung“ [Book et al. - 2009], die Polyamidräder eine „schlagende und rollende Belastung“. Variabel einstellbar ist eine Bremswirkung mittels Wirbelstrombremse.

In Summe sind bei diesem Verfahren für LAU-Anlagen 100.000 Überfahrten mit dem Vulkollanrad vorgesehen. Das Vulkollanrad erfährt dabei eine Bremskraft von 0,56 kN. Nach jeweils 100 Überfahrten erfolgt eine 5-minütige Pause, damit das Beschichtungssystem wieder abkühlen kann. Anschließend wird die Prüfung mit dem Polyamidrad über insgesamt 25.000 Zyklen fortgesetzt, jedoch ohne die zusätzliche Einwirkung der Bremskraft. Ein Prüfabbruch erfolgt beim ersten mit dem Auge sichtbaren Schaden. Bei Oberflächenschutzsystemen wird die Prüfung nur mit dem Vulkollanrad durchgeführt. Zur Dokumentation des Verschleißverlaufs wird die Prüfung nicht beim ersten Schaden abgebrochen, sondern mittels eines Lasers aufgezeichnet.

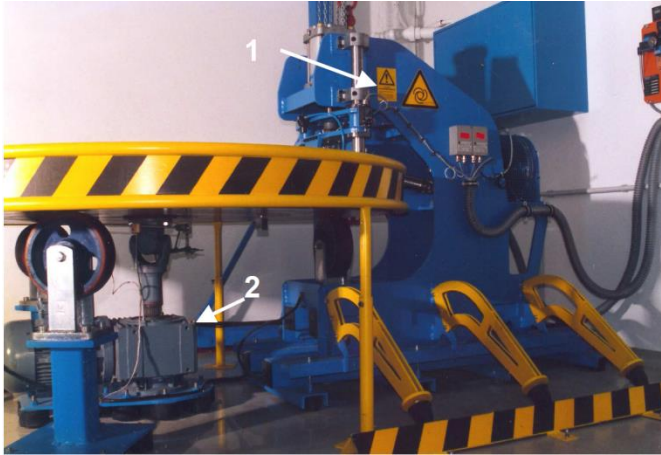


Abb. 3.8: Verschleißprüfmaschine Böttcherer Rad mit Belastungskammer (1) und Antrieb (2) aus [Book et al. - 2009]

### 3.5.6 Verschleißsimulator für Straßenmarkierungsmaterialien nach DIN EN 13197

Mit dem Verschleißsimulator nach [DIN EN 13197] werden Straßenmarkierungsmaterialien im Labor auf ihre Verschleißbeständigkeit überprüft. Bei diesem Verfahren rotiert eine Drehscheibe mit einem Durchmesser von 6,4 m mit einer Geschwindigkeit von bis zu 120 km/h, wobei die Prüfgeschwindigkeit 10 km/h bei Nässe und 60 km/h bei trockenen Prüfbedingungen beträgt. Während der Prüfung wird loses Material abgesaugt und die Reifen (zwei Radpaare gleichzeitig) werden gekühlt. Die Prüfung kann sowohl trocken als auch nass erfolgen. Die Radlast kann zwischen 0 und 4.000 N (in der Prüfung liegt sie bei 3.000 N) variieren und der Reifendruck zwischen 0,0 und 0,3 MPa schwanken. Weiterhin ist es möglich einen Schräglauf (Einfluss auf Verschleiß) und Sturz (Einfluss auf Verschleißbild) einzustellen.

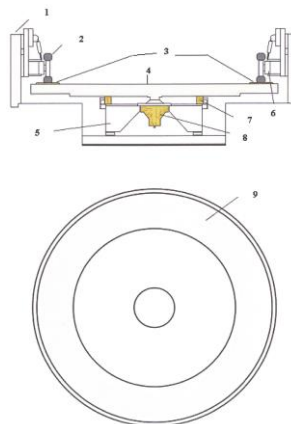


Abb. 3.9: Verschleißsimulator für Straßenmarkierungsmaterialien nach [DIN EN 13197]

Die Mindestprüffläche des zu prüfenden Materials beträgt 800 cm<sup>2</sup>. In Summe müssen je Prüfmaterial drei Prüfkörper angefertigt werden und zu Vergleichszwecken ist ebenfalls ein Standardmaterial mit zu prüfen. 4.000.000 Überfahrten werden in Summe bei diesem Prüfstand erreicht. Dokumentiert wird die Abtragsmenge in Prozent, Griffigkeit sowie Tages- und Nachtsichtbarkeiten. Der Prüflauf ist durchgefallen, wenn die Abtragsmenge sowie Tages- und Nachtsichtbarkeit um mehr als 15 % vom Standardmaterial und die Griffigkeit um mehr als 10 % abweicht.

### 3.5.7 Driving Abrasion Test (DAT)

Der Driving Abrasion Test ist ein Versuchsstand der Technischen Universität Kaiserslautern, der in einem vorausgegangenen Forschungsvorhaben zur Erforschung der systematischen Rissflankenbruchneigung entwickelt wurde [Schnell et al. - 2014]. An Beschichtungssystemen werden hiermit die Dauerbelastung und Kurvenfahrten simuliert. Weiterhin können verschiedene Rissbreiten eingestellt und die Überfahrbarkeit dieser überprüft werden.

Kreisförmige Betonscheiben mit einem Durchmesser von 150 cm und einer Höhe von 20 cm dienen als Probekörper. Durch den Einbau von zusätzlichen Rissblechen können beliebige Rissbreiten eingestellt werden. Eine Applikation von mehreren Beschichtungssystemen je Probekörper ist möglich, sofern diese eine nahezu identische Aufbauhöhe aufweisen.

Beim Driving Abrasion Test liegt der beschichtete Probekörper auf einer 2 cm dicken Stahlplatte (Drehteller), die über eine Antriebswelle angetrieben wird. Die minimale Geschwindigkeit beträgt 2, die maximale 16 Umdrehungen je Minute. Die Auflast von standardmäßig 450 kg wird über den PKW-Reifen auf den Probekörper eingeleitet. Neben PKW-Reifen können weitere Reifen oder Rollen von Flur- und Förderfahrzeugen eingesetzt werden. In Summe wird der Probekörper mit 25.000 Umdrehungen überfahren ([Ladner - 2013], [Ladner et al. - 2014a], [Ladner et al. - 2014b], [Ladner u. Breit - 2014]).



Abb. 3.10: Prüfapparatur für Driving Abrasion Test (DAT)

### **3.5.8 Vergleich und Bewertung der Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung**

Vergleichend sind in der nachfolgenden Tab. 3.2 die Prüfverfahren dargestellt, bei denen die Oberflächenschutzsysteme einer drehenden, rollenden Beanspruchung ausgesetzt sind. Die Prüfverfahren Taber-Verfahren und BCA-Verfahren sind aus anderen Bereichen (z. B. Taber-Verfahren zur Prüfung der Verschleißbeständigkeit von beschichteten Textilien oder BCA-Verfahren aus dem Estrichbereich) entliehen und zum Nachweis der Verschleißbeständigkeit von Oberflächenschutzsystemen normativ adaptiert worden. Bei den weiteren Verfahren handelt es sich ebenfalls um Verschleißprüfverfahren, bei denen Probekörper einer drehenden, rollenden Beanspruchung ausgesetzt sind und praxisnah für die Simulation des Verschleißverhaltens von Oberflächenschutzsystemen entwickelt wurden.

Tab. 3.2: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung

	Taber Abrieb- verfahren [DIN EN ISO 5470-1]	BCA-Verfahren [DIN EN 13892- 4]	Verschleiß- widerstand nach Böhme nach [DIN EN 13892- 3]	Verschleiß- simulator Straßenmar- kierungs- materialien	Bottroper Rad	Driving Abrasion Test (DAT)
Beanspru- chungsart	Beanspruchung einer horizontalen Drehstreife wird mit zwei u. U. hochbelas- teten Laufrädern simuliert	Rotation von drei Stahlrädern auf dem Probekörper (Rollbean- spruchung)	Schleifende Abrasion des Grundkörpers	Rollbean- spruchung	Rotierende Beanspruchung; Probekörper wird zusätzlich mit einer Bremskraft beaufschlagt	Rollbeanspru- chung eines beschichteten, rotierenden Probekörpers
Ursprüngliches Anwendungs- gebiet	mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien	Zement- und Kunstharzestrich mörtel	Zement- und Kunstharzestrich mörtel	-	-	-
Grundkörper (bei Beschichtungen)	Mit Oberflächenschutzsystem beschichteter Probekörper, ggf. ohne Deckversiegelung	Estriche ohne polymeren Anteil	Gussasphalt	Oberflächen- schutzsysteme, Beschichtungs- systeme in LAU- Anlagen	Oberflächen- schutzsysteme	Oberflächen- schutzsysteme
Gegenkörper	Schleifscheibe oder mit Schleifpapier versehene Walze	Stahlrad (735 HV)	Schleifscheibe mit Korund	Zwei PKW- Radpaare (Größe: 205/60 mit einer Rollbreite von mind. 150 mm)	Vulkollan, Polyamid	PKW-Rad; möglich auch: Vulkollan- und Polyamidrad
Zwischen- medium	Nicht vorhanden	Abrieb	Kein zusätzliches, Abrieb wird entfernt			



Tab. 3.2: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung (Fortsetzung)

	Taber Abrieb- verfahren [DIN EN ISO 5470-1]	BCA-Verfahren [DIN EN 13892- 4]	Verschleiß- widerstand nach Böhme nach [DIN EN 13892- 3]	Verschleiß- simulator Straßenmar- kierungs- materialien	Bottroper Rad	Driving Abrasion Test (DAT)
Umgebungs- medium	Luft					
Prüfgeschwin- digkeit	Max. $0,52 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$\varnothing 7,6 \text{ km/h}$ Max. $8,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	Ca. $2,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	10 km/h bei Nässe und $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ bei Trockenheit	$10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	Max. $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$
Zyklusanzahl	1.000 Zyklen / Rad -> 2.000 Zyklen	2.850 Umdrehungen / Rad -> 8.550 Überfahrungen	16 Zyklen à 22 Umdrehungen	4.000.000 Zyklen mit 4 PKW- Rädern	100.000 Zyklen mit Vulkollanrad, 25.000 Zyklen mit Polyamidrad	25.000 Zyklen
Aufstandsfläche	12,7 mm <sup>2</sup> (Breite der Stahlräder 12,7 mm)	20 mm <sup>2</sup> (Breite der Stahlräder 20 mm)	71mmx71mm= =5.041mm <sup>2</sup>	0,205mx0,15m= =30.000mm <sup>2</sup>	Vulkollan: 80 - 160 mm <sup>2</sup> ; Polyamid: 80 mm <sup>2</sup>	PKW-Rad: 10.000 mm <sup>2</sup> ; Vulkollan: 80 - 160 mm <sup>2</sup> ; Polyamid: 80 mm <sup>2</sup>
Verschleißart nach [DIN 50320]	Gleitverschleiß Wälzverschleiß	Wälzverschleiß	Gleit-, Korngleit- verschleiß	Gleit-, Wälz-; Korngleit- bzw. Kornwälzver- schleiß durch Abrieb	Gleit-, Wälz-; Korngleit- bzw. Kornwälz- verschleiß durch Abrieb	Gleit-, Wälz-; Korngleit- und Kornwälz- verschleiß durch Abrieb

Tab. 3.2: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung (Fortsetzung)

	Taber Abrieb- verfahren [DIN EN ISO 5470-1]	BCA-Verfahren [DIN EN 13892- 4]	Verschleiß- widerstand nach Böhme nach [DIN EN 13892- 3]	Verschleiß- simulator Straßenmar- kierungs- materialien	Bottroper Rad	Driving Abrasion Test (DAT)
Maßgebender Verschleiß- mechanismus nach [DIN 50320]	Oberflächenzerüttung			Abrasion		
Auftretende Kräfte (Normalkräfte mit $\max. F_N = \frac{F}{A}$ )	$\max. F_N = \frac{9,8N}{12,7mm^2} = 770 \frac{N}{m^2}$	$\max. F_N = \frac{650N}{20mm^2} = 32.500 \frac{N}{m^2}$	$\max. F_N = \frac{294N}{5,041mm^2} = 58,3 \frac{N}{m^2}$	$\max. F_N = \frac{3.000N}{0,03mm^2} = 100 \frac{N}{m^2}$	Polyamidrad (höhere Auflast): $\max. F_N = \frac{5.000N}{80mm^2} = 62.500 \frac{N}{m^2}$	$\max. F_N = \frac{4.500N}{0,01mm^2} = 450 \frac{N}{m^2}$
Auftretende Kräfte (Scherkräfte mit $\max. F_R = \mu_G \times F_N$ )	$\max. F_R = \frac{1,4 \times 770N}{mm^2} = 1.078 \frac{N}{mm^2}$	$\max. F_R = \frac{0,35 \times 32.500N}{mm^2} = 16.250 \frac{N}{mm^2}$	$\max. F_R = \frac{1,2 \times 58,3N}{mm^2} = 70 \frac{N}{mm^2}$	$\max. F_R = \frac{1,0 \times 100N}{mm^2} = 100 \frac{N}{mm^2}$	Polyamidrad: $\max. F_R = \frac{0,9 \times 62.500N}{mm^2} = 56.250 \frac{N}{mm^2}$	$\max. Q = \frac{1,2 \times 450N}{mm^2} = 540 \frac{N}{mm^2}$

Tab. 3.2: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung (Fortsetzung)

	Taber Abrieb- verfahren [DIN EN ISO 5470-1]	BCA-Verfahren [DIN EN 13892- 4]	Verschleiß- widerstand nach Böhme nach [DIN EN 13892- 3]	Verschleiß- simulator Straßenmar- kierungs- materialien	Bottroper Rad	Driving Abrasion Test (DAT)
Hertz' sche Flächenpressung	$0,14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$39,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Nicht ermittelbar	$0,37 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$18,91 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$0,46 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Auswertung / Dokumentation	Gewichts- differenz / Masseverlust, Farbabgleich	Tiefenmessung mittels Tiefensensor oder Profiltiefen- Messgerät an vorher definierten Messpunkten	Ermittlung des Volumenverlusts	Abriebsmenge, Griffigkeit, Tag- und Nachtsicht- barkeit	Visuell (Fotos), Befahrbarkeits- nachweis	Bohrkernent- nahme, visuell (Fotos), Schichtdicken- messung, Laserprofil- messung
<p>Anmerkung bzgl. Reibkoeffizienten:            BCA- Verfahren: <math>\mu_0</math> entnommen aus [Müller - 2009] für die Materialkomponenten „Stahl auf Beton“            Böhme-Scheibe: geschätzter Wert            Verschleißsimulator und Aachener Ravelling Tester: <math>\mu_0</math> wird mit einem Wert von 1,0 angenommen (nach [Klempau - 2004])            Bottroper-Rad: <math>\mu_0</math> entnommen aus [Book et al. - 2009]</p>						

Nachfolgend werden die Randbedingungen der vorgenannten Prüfverfahren kurz bewertet:

Die beim Taber-Verfahren auftretende Beanspruchungsart ist vergleichbar mit der Belastung in Parkbauten. Die Zyklenzahl als auch die Auflast im originären Versuch ist jedoch als deutlich zu gering einzustufen. Auch die Prüfgeschwindigkeit liegt wesentlich niedriger und der Gegenkörper entspricht mit einer Schleifscheibe oder Walze nicht der Praxis, sodass ein wesentliches Konstruktionsmerkmal nicht berücksichtigt wird. Die entstehenden Kräfte, bezogen auf die Radaufstandsfläche, korrelieren mit denen im Parkhaus sehr gut.

Zur Prüfung der Verschleißeigenschaften von Estrichen wurden bei der europäischen Estrichmörtel-Normung die Prüfverfahren BCA und Böhme aufgenommen. Das BCA-Verfahren wurde ebenfalls für Beschichtungssysteme adaptiert, wenngleich bereits Probleme bei der Beurteilung und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse innerhalb von Estrichprüfungen existieren [Erning - 2003]. Die Prüfgeschwindigkeit beim BCA-Verfahren spiegelt weitestgehend die Fahrgeschwindigkeit im Parkhaus wider. Auf die Aufstandsfläche wirken jedoch deutlich höhere Kräfte und somit liegt auch eine höhere Hertz'sche Flächenpressung vor, als sie durch PKW-Verkehr verursacht werden. Die Stahlräder weisen kein viskoelastisches Materialverhalten auf. Daher gleiten diese eher über die Oberfläche während PKW-Räder sich besser an die Oberflächenstruktur anpassen und damit ein anderer Verschleißmechanismus vorliegt. Die vorgesehene Zyklenzahl ist als zu gering einzustufen. Bei der Böhme-Scheibe werden Belastungen angesetzt, bei denen sowohl die Auflast als auch die Dauer deutlich unter denen im Parkbau liegen. Auch liegt hier nur die Verschleißart Gleitreibung und nicht Rollreibung vor.

Während die Zyklenzahl beim Verschleißsimulator für Straßenmarkierungsmaterialien denen im Parkbau am nächsten kommt, sind die gewählten Lasten für die Beanspruchungen zu niedrig. Die Prüfgeschwindigkeit bei Nässe stimmt mit der im Parkbau überein, die bei Trockenheit ist zu hoch. Grund- und Gegenkörper stimmen mit dem realen Lastfall überein.

Das Bottroper Rad bzw. das Verschleißprüfverfahren für LAU-Anlagen verfügt über eine angemessene Anzahl an Prüfzyklen und Prüfgeschwindigkeit. Mit den gewählten Vulkollan- und Polyamidrädern besteht der Gegenkörper wie der PKW-Reifen aus einem Kunststoff. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahren ist die Möglichkeit Bremsvorgänge simulieren zu können. Die Belastungen sind jedoch deutlich höher als im Parkhaus (vgl. Tab. 3.2).

Beim Driving Abrasion Test wurden die gleichen Reibpartner und auch Lasten wie im Parkhaus gewählt, sodass diese mit der Realität sehr gut übereinstimmen und dieses Verfahren die Praxis am nächsten widerspiegelt. Die Zyklenzahl ist bei diesem Verfahren jedoch als zu niedrig einzustufen und kann bei Bedarf entsprechend angepasst werden.

### **3.6 Stehend, rollende Prüfverfahren für Oberflächenschutzsysteme**

#### **3.6.1 Allgemeines**

Die Prüfverfahren werden in diesem Abschnitt sowie dem vorherigen Abschnitt 3.5 entsprechend ihrer Beanspruchungsart unterschieden: drehend rollend und stehend rollend.

Als stehend, rollende Prüfverfahren für Oberflächenschutzsysteme ist das RWA-Verfahren normativ zugelassen. Bis Ende 2008 war es ebenfalls zulässig die Verschleißbeständigkeit mit der Stuttgarter Prüfung nachzuweisen. Mit den weiteren Prüfverfahren (Aachener Ravelling Tester, Bänziger Rad und Parking Abrasion Test) kann ebenfalls Verschleiß durch eine stehend, rollende Bewegung simuliert werden. Diese wie auch die normativ zugelassenen Prüfverfahren werden anschließend hinsichtlich ihrer Eignung für die Darstellung des Verschleißverhaltens von Oberflächenschutzsystemen bewertet.

#### **3.6.2 Stuttgarter-Prüfung nach DIN EN 660-1**

Die Stuttgarter Prüfung wurde für die Bestimmung des Verschleißverhaltens der Nutzschichten von Polyvinylbelägen durch eine Dreh-Schlupfbewegung konzipiert. Ziel dieses Verfahrens ist die Simulation von Fußgänger-Verkehr auf den genannten Bodenbelägen. Mittels eines ( $17 \pm 0,1$ ) kg schweren Pendels (Nummer 1 in Abb. 3.11) werden Verschleiß- und Walkbeanspruchungen simuliert. Zunächst erfolgt eine Vorschädigung des Probekörpers durch eine Eindrückbeanspruchung (60 s mit einer Kraft von  $(4.000 \pm 100)$  N). Anschließend wird der Probekörper zusätzlich beansprucht mit Schleifpapier für eine Verschleißbeanspruchung und einer Ledersohle als Walkbeanspruchung. Schleifpapier und Leder können dabei an der Unterseite des Pendels befestigt werden. Für die Prüfung von Oberflächenschutzsystemen wird das Prüfverfahren entsprechend modifiziert, die Walkbeanspruchung erfolgt statt dem Leder mit einem 2,5 mm dicken Gummi (Shore-Härte A ( $90 \pm 2$ ), [DAfStb - 2001]). Die Verschleißsimulation erfolgt je Zyklus folgendermaßen:

- Eindrückbeanspruchung mit Nagelbrett vor dem ersten Prüfzyklus
- Verschleißbeanspruchung durch ein Pendel, das auf dem Schleifpapier aufgespannt ist. Der Probekörper erfährt vier Umdrehungen je Minute, während das Pendel die Oberfläche mit drei Doppelhüben beansprucht. Die losgelösten Partikel verbleiben auf der Oberfläche.
- Walkbeanspruchung mit einer Gummisohle über 4 x 50 Doppelhübe; alle 50 Doppelhübe erfolgt eine Pause von zwei Minuten, sodass sich Probekörper und Gummisohle abkühlen können.

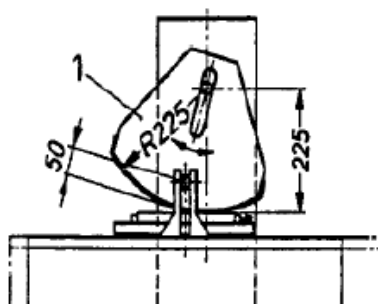


Abb. 3.11: Prüfapparatur für Stuttgarter Prüfung nach [DIN EN 660-1]

Bei den OS 13-Systemen erfolgt die Prüfung ohne Deckversiegelung, bei allen anderen mit Deckversiegelung [DAfStb - 2001]. Der Verschleiß wird visuell sowie über den Dickenverlust der entstandenen kreisförmigen Fläche auf dem Probekörper ermittelt. Bei den OS 13-Systemen wird der Masseverlust zwischen 50 und 2.000 Doppelhüben ermittelt, bei allen anderen nach 1.000 und 2.000 Doppelhüben. Vor der Prüfung wird die Oberfläche gereinigt und loses Material entfernt. Das Herausbrechen ganzer Körner, die zu 50 % eingebunden waren, ist nicht gestattet. Ebenfalls unzulässig ist ein Abrieb von mehr als 4,5 g.

Der Massenverlust an der angenommenen Verschleißfläche von 150 cm<sup>2</sup> wird nach Gleichung (3.4) bestimmt.

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (3.4)$$

mit:  $\Delta m$  Masseverlust  
 $m_1$  Anfangsmasse der Probe in g  
 $m_2$  Endmasse der Probe in g

Der Dickenverlust an der angenommenen Verschleißfläche von 150 cm<sup>2</sup> wird nach Gleichung (3.5) bestimmt.

$$\Delta l = \frac{10 \times \Delta m}{A \times \rho} \quad (3.5)$$

mit:  $\Delta l$  Dickenverlust  
 $A$  angenommene Verschleißfläche von 150 cm<sup>2</sup>  
 $\rho$  Rohdichte in g/cm<sup>3</sup>

Im November 2013 wurde die Stuttgarter Prüfung zurückgezogen.

### 3.6.3 RWA-Verfahren nach DIN EN 13892-5

Analog zu dem unter Abschnitt 3.5.3 angegeben Verfahren, wird bei dem RWA-Verfahren (Rolling Wheel Abrasion) ebenfalls der Verschleißwiderstand an Zementestrich- und Kunstharzmörteln durch Rollbeanspruchung bestimmt. Ein mit

( $2.000 \pm 10$ ) N belastetes Laufrad (Abb. 3.12) ist auf einer drehbaren, (horizontalen) quadratischen Prüfplatte aufgebracht. Diese bewegt sich „horizontal in zwei im rechten Winkel kreuzenden Richtungen bei unterschiedlichen Drehzahlen. Diese Bewegung verursacht Normal- und Scherspannungen im Estrichmörtel. An den Wendepunkten des Laufrades wird eine durch Torsion hervorgerufene Scherkraft zusätzlich erzeugt“ (S. 6, [DIN EN 13892-5]). Der Widerstand gegen Rollbeanspruchung wird an drei Proben bestimmt.

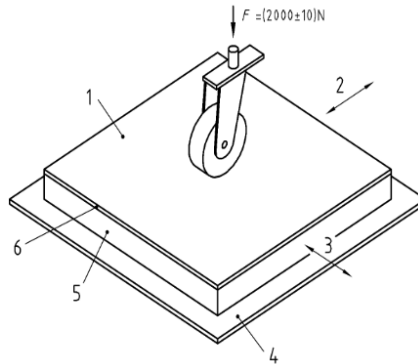


Abb. 3.12: Prüfaufbau RWA-Verfahren nach [DIN EN 13892-5]

Mit Beendigung des Versuches nach 10.000 Zyklen in die lange Laufrichtung (5 Messpunkte) wird die Verschleißtiefe an jedem Kreuzungspunkt (insgesamt 15 Messpunkte) ermittelt. Der Rollwiderstand  $RWA$  ergibt sich aus der mittleren Tiefe multipliziert mit dem Faktor 0,11 (bezogen auf eine abgeriebene Fläche von  $1.100 \text{ cm}^2$ ). Dieser wird auf  $1 \text{ cm}^3$  gerundet angegeben.

$$RWA = 0,11 \times d \quad (3.6)$$

mit:  $RWA$  Rollwiderstand in  $\text{cm}^3$   
 $d$  mittlere Tiefe in  $\mu\text{m}$

### 3.6.4 Aachener-Ravelling-Tester (ARTe)

Ziel des Aachener-Ravelling-Testers (ARTe, Abb. 3.13) ist die Bestimmung des Widerstands gegen Kornausbrüche an offenporigen Asphalten. Entwickelt wurde dieser Prüfstand am Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen. Bei diesem ist es möglich einen eingespannten Probekörper gleichzeitig einer translatorischen, durch Verfahren des Schlittens mit einer Geschwindigkeit von  $0,3 \text{ m/s}$ , und einer rotatorischen, durch Drehung der beiden belasteten Reifen mit einer Drehgeschwindigkeit von 41 Umdrehungen je Minute, Bewegung auszusetzen. Die Reifen mit einem Reifendruck von 3 bar rotieren bei einer Auflast von 200 kg. Kurvenfahrten, Brems- und Beschleunigungsvorgänge können durch die entstehenden Schubkräfte in der Kontaktzone simuliert werden. In Summe erfährt der Probekörper 6.150 Belastungszyklen in fünf Belastungsstufen à 30 Minuten. Bei einer

Prüfung werden zwei Probekörper mit den Abmessungen 26 cm x 32 cm oder ein Probekörper mit den Abmessungen 32 cm x 54 cm verwendet. Die Auswertung erfolgt durch Bestimmung des Masseverlustes oder durch 3D-Textur-Messungen ([ARTe - 2011], [Renken - 2018]).

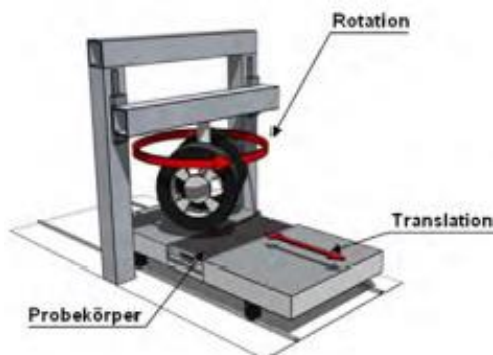


Abb. 3.13: Aachener Ravelling Tester (ARTe) aus [ARTe - 2011]

### 3.6.5 Bänziger Rad Sika Deutschland GmbH

Im 3. Kolloquium Verkehrsbauten, Schwerpunkt Parkhäuser / Brücken im Januar 2008 wurde eine Prüfapparatur zur Bestimmung der Walkbewegungen (auch bekannt unter dem Namen Bänziger Rad, Abb. 3.14) von der damaligen Sika Deutschland AG vorgestellt [Zilg et al. - 2008]. Bei diesem Prüfgerät rotiert ein PKW-Reifen innerhalb von 2,5 Sekunden auf der Stelle um 100°. Die Belastung des pneumatisch angetriebenen PKW-Reifens mit der Größe 175/65 R 14 beträgt 230 kg. Ohne Pause dreht der Reifen anschließend in entgegengesetzter Richtung zurück. Die beiden Drehbewegungen entsprechen einem Zyklus. Die maximal ausgeführte Prüfzyklenanzahl beträgt 15.000 Zyklen. Die Prüfung erfolgt an einem Stück ohne Dokumentation des Verschleißes zwischendurch. Die entstehende Oberflächentemperatur soll die sommerlichen Temperaturen auf einem Freideck simulieren. Der Verschleiß wird fotografisch dokumentiert und in die zuvor festgelegte Verschleißkategorie (leichte Abnutzung der Versiegelung über ausgebrochene Körner und vereinzelte Risse bis zu großflächigen Ausbrüchen / ohne Versiegelung und vollständige Abnutzung der Verschleißschicht) eingeordnet.





Abb. 3.14: Prüfapparatur zur Ermittlung des Verschleißes der Sika Deutschland GmbH [Ladner et al. - 2018]

Bei der Weiterentwicklung des Prototyps durch die Sika Deutschland GmbH wurde das Rad mit einer Auflast von 400 kg belastet und die Rotation auf 80° angepasst [Ladner et al. - 2018]. Im Zuge der Weiterentwicklung wurde zusätzlich nach jeder Rückdrehung eine Pause von 10 Sekunden eingebaut. Ebenfalls neu entwickelt wurde ein Prüfschema für die Prüfung der Probekörper (Abb. 3.15). Auf jedem Probekörper ist eine Prüfung an vier Prüfstellen erforderlich. Die erste Prüfung erfolgt immer nach 2.000 Zyklen. In Abhängigkeit vom Prüfergebn wird die nächste Zyklenanzahl festgelegt.

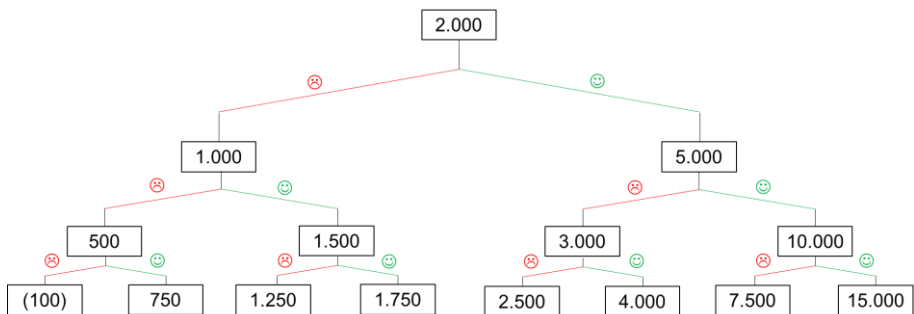


Abb. 3.15: Prüfschema der Verschleißprüfung mit dem Bänziger Rad der Sika Deutschland GmbH nach [Ladner et al. - 2018]

### **3.6.6 Parking Abrasion Test (PAT)**

Der Parking Abrasion Test (PAT) in Abb. 3.16 ist ein Prüfstand der Technischen Universität Kaiserslautern, der am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen konstruiert wurde. Der Parking Abrasion Test ist eine gemeinsame Weiterentwicklung des Prüfstands der Sika Deutschland GmbH, der Bilfinger Berger SE und der Technischen Universität Kaiserslautern ([Krams - 2010], [Breit et al. - 2015a], [Breit u. Ladner - 2017b]). Mit diesem Prüfstand wird sowohl der Einparkvorgang durch die Rotation des Rades auf der Stelle als auch das Anfahren und Halten simuliert. Durch Pausen entstehen zusätzlich jedes Mal die für das Oberflächenschutzsystem kritischen Anfahr- und Bremskräfte.

Auf den quadratischen Betongrundkörpern (Typ C (0,45) nach [DIN EN 1766]) mit einer Kantenlänge von 50 cm und einer Höhe von 5 cm werden die Beschichtungssysteme appliziert. Je Probekörper kann nur ein System aufgebracht werden.

Die Auflast auf dem handelsüblichen PKW-Reifen (195/65 R15) beträgt 450 kg. Der Reifen rotiert innerhalb von vier Sekunden um 90°. Nach einer Pause von sieben Sekunden rotiert er in der gleichen Geschwindigkeit wieder zurück. Jede Rotation mit zugehöriger Pause wird als Zyklus bezeichnet. Die maximal ausgeführte Zyklenanzahl beträgt 15.000. Dies entspricht einer reinen Prüfzeit von 2.750 Minuten bzw. 46 Stunden.



Abb. 3.16: Prüfapparatur für den Parking Abrasion Test (PAT)

### **3.6.7 Vergleich und Bewertung der Prüfverfahren mit einer stehenden, rollenden Beanspruchung**

Vergleichend sind in der nachfolgenden Tab. 3.3 die vorgenannten Prüfverfahren zusammengefasst und werden hinsichtlich der Simulation der Verschleißart sowie der Prüfparameter verglichen. Das „RWA-Verfahren“ (und früher auch die „Stuttgarter Prüfung“) ist ebenfalls ein normatives Prüfverfahren für die Bestimmung des Verschleißes von Oberflächenschutzsystemen. Wie auch bei den Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung stellen hier drei nicht normativ geregelte Prüfverfahren weitere Prüfverfahren aus der Praxis dar: Aachener Ravelling Tester, Bänziger Rad und Parking Abrasion Test.

Tab. 3.3: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer stehenden, rollenden Beanspruchung

	Stuttgarter Prüfung [DIN EN 660-1]	RWA-Verfahren [DIN EN 13892-5]	Aachener Ravelling Tester (ARTe)	Parking Abrasion Test (PAT) bzw. Bänziger Rad
Beanspruchungsart	Simulation der Belastung (Eindrückbeanspruchung mit Stahlstiften, Verschleißbeanspruchung mittels Schleifpapier und Walk- beanspruchung mit einer Ledersohle) durch Fußgänger mittels einer Dreh-Schlupfbewegung	Bewegung einer hochbelasteten Rolle in x- und y-Richtung über den zu prüfenden Probekörper (Rollbeanspruchung)	Translatorische und rotatorische Belastung der Oberfläche durch PKW-Reifen	Auf der Stelle um 90° rotierender PKW-Reifen
Ursprüngliches Anwendungsgebiet	Nutzschicht von Polyvinylchlorid- Bodenbelägen	Zement- und Kunstharzestrichmörtel	-	-
Grundkörper (bei Beschichtungen)	Mit Oberflächenschutzsystem beschichteter Probekörper, ggf. ohne Deckversiegelung		Offenporige Asphalte	Oberflächen- schutzsysteme
Gegenkörper	Metallstifte, Schleifpapier, Gummisohle (bei OS- Systemen)	Gehärtete Stahlrollen	PKW-Rad	PKW-Rad
Zwischenmedium	Nicht vorhanden		Kein zusätzliches, Abrieb wird entfernt	

Tab. 3.3: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer stehenden, rollenden Beanspruchung (Fortsetzung)

	Stuttgarter Prüfung [DIN EN 660-1]	RWA-Verfahren [DIN EN 13892-5]	Aachener Ravelling Tester (ARTe)	Parking Abrasion Test (PAT) bzw. Bänziger Rad
Umgebungsmedium	Luft			
Prüfgeschwindigkeit	Rolltisch: ca. $0,51 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Dreheller: ca. $0,15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Außenkante)	Längsrichtung: $0,33 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Querrichtung: $0,05 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	41 Umdrehungen/ Minute	k. A. möglich, da Rotation auf Stelle
Zyklusanzahl	2.000 Doppelhübe -> 4.000 Bewegungen	10.000 Zyklen auf $1.014 \text{ cm}^2$ -> Während einer Zykluslänge findet eine Querbewegung von ca. 5,5 cm statt, ca. 4 Zyklen notwendig für Befahrung der ganzen Beschichtung Überfahung je Punkt: 2.500 mal	6.150	15.000
Aufstandsfläche	35 mm x 106 mm = $3.710 \text{ mm}^2$ (angenommene Breite)	40 mm <sup>2</sup> (Breite des Stahlrads 40 mm)	10.000 mm <sup>2</sup>	10.000 mm <sup>2</sup>
Verschleißart nach [DIN 50320]	Gleitverschleiß, Wälz- verschleiß; Kornwälz- verschleiß (Schleifpapier / entstehendem Abrieb Stoßverschleiß durch Nagelbrett	Gleitverschleiß Wälzverschleiß	Gleit-, Wälz-, Bohr-, Korngleit- und Kornwälz- verschleiß durch Abrieb	Gleit-, Bohr-, Korngleit- verschleiß durch Abrieb

Tab. 3.3: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer stehenden, rollenden Beanspruchung (Fortsetzung)

	Stuttgarter Prüfung [DIN EN 660-1]	RWA-Verfahren [DIN EN 13892-5]	Aachener Ravelling Tester (ARTe)	Parking Abrasion Test (PAT) bzw. Bänziger Rad
Maßgebender Verschleißmechanismus nach [DIN 50320]	Abrasion (Metallstifte und Schleifpapier) und Adhäsion (Gummisohle)	Oberflächenzerstörung	Adhäsion	
Auftretende Kräfte (Normalkräfte mit $\max. F_N = \frac{F}{A}$ )	$\max. F_N = \frac{170N}{3.710mm^2} =$ $= 45,82 \frac{kN}{m^2}$	$\max. F_N = \frac{2.000N}{40mm^2} =$ $= 50.000 \frac{kN}{m^2}$	$\max. F_N = \frac{2.000N}{0,01mm^2} =$ $= 200 \frac{kN}{m^2}$	PAT: $\max. F_N = \frac{4.500N}{0,01mm^2} =$ $= 450 \frac{kN}{m^2}$ Bänziger Rad: $\max. F_N = \frac{4.000N}{0,01mm^2} =$ $= 400 \frac{kN}{m^2}$
Auftretende Kräfte (Scherkräfte mit $\max. F_R = \mu_G \cdot F_N$ )	$\max. F_R = \frac{1,2 \times 45,82}{55} \frac{kN}{mm^2} =$ $= 1,2 \times 45,82 \frac{kN}{mm^2} =$ $= 55 \frac{kN}{mm^2}$	$\max. F_R = \frac{0,35 \times 50.000}{17.500} \frac{kN}{mm^2} =$ $= 1,0 \times 200 \frac{kN}{mm^2} =$ $= 200 \frac{kN}{mm^2}$	$\max. Q =$ $= 1,0 \times 200 \frac{kN}{mm^2} =$ $= 200 \frac{kN}{mm^2}$	PAT: $\max. Q =$ $= 1,2 \times 450 \frac{kN}{mm^2} = 540 \frac{kN}{mm^2}$ Bänziger Rad: $\max. Q =$ $= 1,2 \times 400 \frac{kN}{mm^2} = 480 \frac{kN}{mm^2}$

Tab. 3.3: Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer stehenden, rollenden Beanspruchung (Fortsetzung)

	Stuttgarter Prüfung [DIN EN 660-1]	RWA-Verfahren [DIN EN 13892-5]	Aachener Ravelling Tester (ARTe)	Parking Abrasion Test (PAT) bzw. Bänziger Rad
Hertz'sche Flächen- pressung	Nicht ermittelbar	$63,30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$0,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	PAT: $0,46 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ Bänziger Rad: $0,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Auswertung	Gewichtsdifferenz / Masseverlust	Tiefenmessung mittels Tiefensensor oder Profiltiefen-Messgerät an vorher definierten Messpunkten	Masseverluste oder 3D- Textur-Messungen	PAT: Bohrkern- entnahme, visuell (Fotos), Schichtdicken- messung, Laserprofil- messung Bänziger Rad: Visuell (Fotos); Eingruppierung in Verschleißklassen
Anmerkung bzgl. Reibungskoeffizienten: Böhme-Scheibe: geschätzter Wert				

Im Detail bedeutet dies:

Bei der Stuttgarter Prüfung wurde die Prüfung mit der Gummisohle entsprechend angepasst, sodass die gleichen Materialkomponenten aufeinandertreffen. Sowohl Zyklusanzahl als auch Prüfgeschwindigkeit sind deutlich niedriger als in der Praxis. Das gleiche gilt für die auftretenden Kräfte, die auf Parkhausbeschichtungen einwirken.

Zur Prüfung der Verschleißigenschaften von Estrichen wurden bei der europäischen Estrichmörtel-Normung das Prüfverfahren RWA aufgenommen. Während beim BCA-Verfahren nur eine rollende Bewegung vorliegt, treten beim RWA-Verfahren zusätzlich Scher- und Torsionskräfte auf. Die Prüfgeschwindigkeit spiegelt jedoch beim RWA-Verfahren nicht die Praxis wider, da sie deutlich zu niedrig ist. Ebenfalls entstehen beim RWA-Verfahren deutlich höhere Kräfte und auch eine höhere Hertz'sche Flächenpressung als sie durch PKW-Verkehr verursacht werden. Die Stahlräder weisen kein viskoelastisches Materialverhalten auf. Daher gleiten diese eher über die Oberfläche während PKW-Räder sich besser an die Oberflächenstruktur anpassen und damit ein anderer Verschleißmechanismus vorliegt. Die vorgesehene Zyklusanzahl ist bei beiden Verfahren zu niedrig.

Beim Aachener Ravelling Tester wird der Probekörper ebenfalls mit einem PKW-Reifen beansprucht. Die Auflast mit 200 kg beträgt in etwa die Hälfte der im Parking Abrasion Test verwendeten Last. Neben der rotatorischen erfährt der Probekörper zusätzlich eine translatorische Beanspruchung. Dadurch können gezielt Kornausbrüche hervorgerufen werden. Dies spielt bei offenporigen Asphalten eine wichtigere Rolle als bei Oberflächenschutzsystemen.

Der Parking Abrasion Test bzw. das Bänziger Rad sind speziell zur Überprüfung der Verschleißbeständigkeit von Oberflächenschutzsystemen in Parkbauten entwickelt worden. Über die Geschwindigkeit kann keine Aussage getroffen werden, da das Rad auf der Stelle rotiert. Da ein handelsüblicher PKW-Reifen verwendet wird, stimmen die beiden Reibpartner mit denen im Parkbau überein. Betrachtet man nur die Belastungen, so ist festzustellen, dass diese die Realität widerspiegeln. Jedoch führt eine maximale Achslast von 20 kN nach [DIN EN 1991-1-1] zu einer Verdopplung der Normalkräfte (vgl. Tab. 3.1 und Tab. 3.3). Beim Parking Abrasion Test wird als Modell ein PKW mit einem durchschnittlichen Gewicht von 1.800 kg herangezogen. Auch die Zyklusanzahl wird niedriger als im Parkbau sein, wenngleich die Rotation auf der Stelle eine deutlich höhere Beanspruchung verursacht als reines Überfahren. Durch die Pausen und die entgegengesetzte Rotation in Ausgangsstellung bzw. das ständige Anfahren treten höhere Kräfte auf, während die Hertz'sche Flächenpressung mit der Praxis übereinstimmt. Die reine Prüfzeit beträgt bei diesem Verfahren mit den gewählten Beanspruchungen bereits fast 46 Stunden.

Von den hier vorgestellten Prüfverfahren kann mit dem Parking Abrasion Test die Praxis am nächsten dargestellt werden. Neben den Reibpartnern erweisen sich auch Auflast und die Prüfzyklusanzahl als praxisnah.



### **3.7 Zusammenfassung und Bewertung der Prüfverfahren**

In Kapitel 3 wurden die Begriffe Verschleiß und Reibung erörtert, die hinsichtlich der Bewertung von Prüfverfahren notwendig sind. Um ein Prüfverfahren bzgl. der Nachstellung der Realität bewerten zu können, mussten die auftretenden Verschleißmechanismen und wirkenden Kräfte auf das Beschichtungssystem analysiert werden. Es wurden sowohl die normativ geltenden Verfahren als auch weitere Prüfverfahren, die generell zur Bestimmung der Verschleißbeständigkeit verwendet werden, verglichen und bewertet. Es zeigte sich bei der Analyse deutlich, dass die normativen Prüfverfahren den Verschleiß nicht realitätsnah widerspiegeln können und somit keines davon ein praxisnahes Verfahren darstellt. Zum Zeitpunkt der Festlegung dieser normativen Verfahren in den Regelwerken ([DIN V 18026], [DAfStb - 2001], [DIN EN 1504-2]) existierten in Deutschland keine alternativen, realitätsnäheren Verfahren. Die weiteren genannten Verfahren wurden später entwickelt und sind z. T. auch als Norm wiederzufinden. Der Parking Abrasion Test bzw. das Bänziger Rad wurden speziell für den Lastfall im Parkhaus konzipiert und bilden am besten die gegenwärtigen Belastungen von PKWs realitätsnah ab. Die Beanspruchungsgrößen mit Reifenart und Auflast spiegeln die Beanspruchungen durch einen PKW wider. Ebenfalls können durch die Rotationspausen und dem damit verbundenen „Bremsen und Anfahren“ weitere Beanspruchungen in kritischeren Bereichen im Parkhaus simuliert werden. Dies ist ein entscheidender Unterschied zum Driving Abrasion Test, bei dem eine einfache Überrollung stattfindet. Durch die Pausen wird zusätzlich ein Überhitzen des Oberflächenschutzsystems verhindert, sodass der Glasübergangspunkt der Beschichtungssysteme nicht erreicht wird. Die wesentlichen Konstruktionsparameter mit der Applikation eines Oberflächenschutzsystems auf einer Betonplatte sind bei den Probekörpern berücksichtigt. Mit Einhaltung der Beanspruchungsparameter aus der Praxis lässt dies auf erfolgsversprechende Bauteilversuche und somit einem praxisnahen Verschleißprüfstand schließen. Aufgrund der größeren Auflast gegenüber dem Bänziger Rad wird für die weiteren praktischen Untersuchungen daher der Parking Abrasion Test herangezogen.

An den rauen Oberflächen in Parkbauten haftet der PKW-Reifenabrieb zum Teil stark an der Oberfläche. Zusätzlich ist es bei den zum Teil geringen Abtragsmengen sehr gering. Die Ergebnisse aus der Bestimmung der Gewichts Differenz können daher leicht stark verfälscht werden. Ebenfalls führt dies zu Messfehlern beim Tiefenabtrag. Eine Abtragstiefenmessung wird durch die Rauheit der Oberfläche zusätzlich erschwert, da Tal und Kornspitze dicht nebeneinanderliegen. Die normativen Auswerteverfahren sind daher nur bedingt auf Oberflächenschutzsysteme übertragbar, da diese für andere Anwendungsbereiche mit glatten Oberflächen konzipiert wurden. Die Oberflächenrauheit erschwert nicht nur die Auswertung, sondern verändert auch Schadensmechanismus und Beanspruchung, infolge einer Kombination aus „falschen“ Rädern / Rollen und falscher Oberfläche. Für eine genaue Bestimmung von Abtragstiefen sind daher andere Verfahren anzuwenden [Ladner et al. - 2014b].

Positive Rückmeldung zum Parking Abrasion Test kann bereits der Fachliteratur (u. a. [Schwamborn u. Wolff - 2012]) entnommen werden, da diese Modellversuche

praxisnah sind. Um dieses Verfahren jedoch normativ einführen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig, die nachfolgend erläutert werden.

## 4 Parking Abrasion Test

### 4.1 Allgemeines

Als Prüfverfahren für die praktischen Versuche wurde der Parking Abrasion Test ausgewählt, da dieser die realitätsnahen Beanspruchungen nach der tribologischen Betrachtung am besten abbildet. Sowohl die entstehenden Normal- und Querkräfte als auch die Hertz'sche Flächenpressung stimmen zwischen Prüfstand und Praxis weitgehend überein. Zudem wird als Prüfrad ein herkömmlicher PKW-Reifen verwendet. Der im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte Aufbau des Prüfstands und der Ablauf der Versuche wird in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter erörtert.

### 4.2 Aufbau Parking Abrasion Test

Grundbaustein des Parking Abrasion Test-Prüfstandes der Technischen Universität Kaiserslautern ist ein hydraulischer Handstapler (Abb. 4.1).

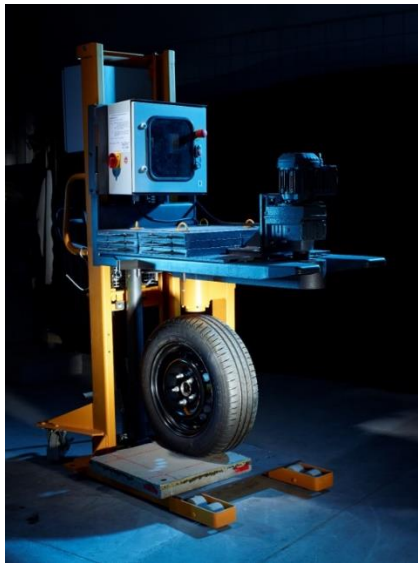


Abb. 4.1: Weiterentwickelte Prüfapparatur für den Parking Abrasion Test (PAT)

Unterhalb der Ladegabeln des Prüfstandes ist ein PKW-Rad mit dem erforderlichen Antrieb montiert. Die Ladegabeln wurden mit Stahlplatten und dem Motor für den Antrieb des PKW-Rades beschwert, um auf den Probekörper mittels des PKW-Rades eine Auflast von  $(450 \pm 5)$  kg wirken zu lassen. Diese Last kann durch Entfernen oder Hinzufügen von Stahlplatten auf den Ladegabeln beliebig variiert werden. Auf den unteren Gabeln wurde eine Stahlplatte mit flexiblem Rahmen montiert, auf der wiederum die Probekörper mit einer Grundfläche von 500 mm x 500 mm fixiert werden können. Da die Ladegabeln hydraulisch mithilfe der Deichsel gehoben werden können, ist ein einfaches Ein- und Ausbauen der Probekörper gewährleistet. Die Breite der unteren Gabeln wurde so umgebaut, dass die Verschleißbeständigkeit ebenfalls direkt „vor Ort“ in einem Parkbau auf den applizierten Beschichtungen bestimmbar ist.

Oberhalb des Deichselsgriffs wurde der Steuerkasten angebracht. An diesem lassen sich sowohl Prüfdauer (Zyklusanzahl) als auch die Pausenzeiten frei programmieren. Der Rotationswinkel wird über Endschalter an den Ladegabeln eingestellt. Bei dem standardmäßig verwendeten PKW-Rad handelt es sich um einen handelsüblichen Sommerreifen (nach [ECE-R30 - 2008]) mit der Größe 195/65 R15 91 und einem Reifendruck von  $(2,3 \pm 0,05)$  bar. Die berechnete Aufstandsfläche beträgt somit ca.  $(2.050 \pm 70)$  mm<sup>2</sup> (ohne Berücksichtigung des Profils, siehe auch [Breit et al. - 2015a]). Die Reifengröße kann flexibel bis zu einer Reifenbreite von 215 mm eingebaut werden. Seitlich ist am Prüfstand des Parking Abrasion Test zusätzlich der normative BCA-Prüfstand konstruiert worden, sodass mit beiden Verfahren vergleichende Verschleißprüfungen durchgeführt werden können. Die Versuchsergebnisse hierzu können Abschnitt 6.2 entnommen werden.

### 4.3 Herstellung der Betongrundkörper

Die Probekörper bestehen aus einem Betongrundkörper auf dem das zu prüfende Oberflächenschutzsystem beschichtet wird. Der quadratische Betongrundkörper verfügt über eine Kantenlänge von 50 cm und eine Dicke von 5 cm. Verwendet wird ein Beton mit der Güte C (0,45) nach [DIN EN 1766]. Die zugehörige Mischungsberechnung sowie die Frisch- und Festbetonkennwerte können dem Anhang A entnommen werden. Auf jedem Probekörper kann das Beschichtungssystem an vier Messstellen geprüft werden (Abb. 4.2), wobei eine kleinflächige Überlappung nicht vermieden werden kann.

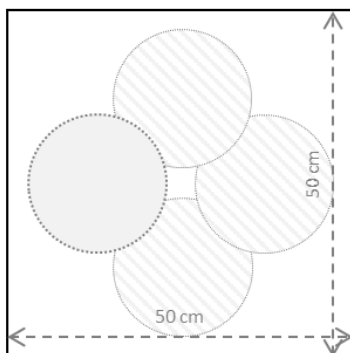


Abb. 4.2: Schematische Darstellung der Anordnung der vier möglichen Messstellen beim Parking Abrasion Test auf einem Probekörper mit der Kantenlänge von 50 cm

Weitere Anforderungen werden an die Oberflächenbeschaffenheit der Betone gestellt. Vor der Applikation eines Oberflächenschutzsystems ist zusätzlich der Nachweis der Rautiefe zwischen 0,30 und 0,50 mm, nach dem Sandflächenverfahren [DIN EN 1766], notwendig. Die geforderte Oberflächenrauheit kann u. a. durch Schleifen oder Sandstrahlen erreicht werden [DAfStb - 2001]. Über die Rautiefe wird ein ausreichender Verbund zwischen Oberflächenschutzsystem und Beton gewährleistet. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurde die geforderte Rautiefe per Sandstrahlen erzielt. Weiterhin ist anzumerken, dass die Betoneinfüllseite

sandgestrahlt und beschichtet wurde, und nicht die Schalseite (wie in [DIN EN 1766] angegeben), da dies den baupraktischen Randbedingungen entspricht.

Die Oberflächenzugfestigkeit wird durch die Prüfung der Abreißfestigkeit nach [DIN EN 1542] nachgewiesen (Tab. 4.1, ([DAfStb - 2001], [DAfStb - 2016])). Bei einer ausreichend hohen Oberflächenzugfestigkeit kann gewährleistet werden, dass die während des Aushärtens des Beschichtungssystems entstehenden Spannungen von der Betonoberfläche aufgenommen werden können. Die Ergebnisse der Oberflächenzugfestigkeiten können dem Anhang A entnommen werden. Die Werte liegen zwischen 2,34 und 5,49 N/mm<sup>2</sup>, sodass die Anforderungen gemäß Tab. 4.1 erfüllt waren. Aufgrund der punktuell wirkenden hohen Anfahr- und Bremskräfte bei den Laborversuchen mit dem Parking Abrasion Test wurde eine Oberflächenzugfestigkeit von mindestens 2,5 N/mm<sup>2</sup> im Einzelwert angestrebt [Breit et al. - 2015].

Tab. 4.1: Anforderungen an die Oberflächenzugfestigkeit der Betongrundkörper vor Applikation eines Oberflächenschutzsystems nach [DAfStb - 2001] bzw. [DAfStb - 2016]

	Oberflächenzugfestigkeit der Betongrundkörper	
	Einzelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]
Oberflächenschutzsystem 8	1,5	2,0
Oberflächenschutzsysteme 11, 13 und 14	1,0	1,5

Auf eine Überprüfung der Feuchtigkeit der Probekörper wurde verzichtet. Durch deren Lagerung im Normalklima bei einer Lufttemperatur von (23 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von (50 ± 10) % nach [DIN EN ISO 291] wurde gewährleistet, dass die Eigenfeuchte des Betongrundkörpers im Bereich der Ausgleichsfeuchte des Betons lag. Die Betongrundkörper wiesen zum Zeitpunkt der Beschichtung ein Alter von mindestens 28 Tagen auf.

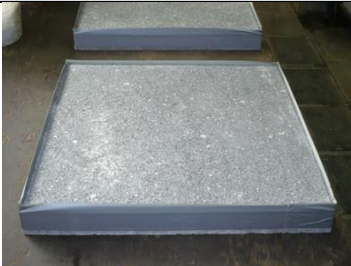







#### 4.4 Applikation der Oberflächenschutzsysteme

Die Applikation der Oberflächenschutzsysteme erfolgte nach Absprache durch die Produkthersteller entweder durch diesen selbst oder durch einen zertifizierten Facharbeiter mit SIVV-Schein (Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen). Die Auftragsmenge sollte dabei den Mindestschichtdicken nach [DAfStb - 2001] entsprechen.

Die Beschichtungsarbeiten sind „bei fallenden Objekt- und Lufttemperaturen“ durchzuführen [Fiebrich - 2006] und die durch das Strahlen entstehenden Luftporen sind mit einer Kratzspachtelung vor dem Aufbringen des Oberflächenschutzsystems zu schließen, sodass ein optimaler Haftverbund erzielt wird.

Die Applikation der Oberflächenschutzsysteme erfolgte analog zur Vorgehensweise in der Praxis (bspw. [Raps et al. - 2013]) und kann am Beispiel einer OS 11a-Beschichtung Tab. 4.2 entnommen werden.

Tab. 4.2: Fotodokumentation der Applikation der Beschichtung am Beispiel eines OS 11a-Systems

Betongrundkörper nach Untergrundvorbereitung	Grundierung und Abstreuerung mit Quarzsand
	
Auftragen der Schwimmschicht	Gleichmäßiges Verteilen und Schichtdickenkontrolle mittels Zahntraufel
	
Auftragen der vorgefüllten Verschleißschicht	Absanden der Verschleißschicht
	
Auftragen der Deckversiegelung	Gleichmäßiges Verteilen der Deckversiegelung
	

## **4.5 Durchführung der Verschleißversuche**

Die Prüfung der Verschleißbeständigkeit von Oberflächenschutzsystemen mit dem Parking Abrasion Test erfolgt über 15.000 Prüfzyklen. Jeder Einzelzyklus besteht aus einer, mittels eines Elektromotors angetriebenen, Rotation des PKW-Rades um 90° innerhalb von vier Sekunden und einer Pause von sieben Sekunden, damit sich das Oberflächenschutzsystem aufgrund der Reibung nicht über 50 °C erhitzt. Da in der Praxis so hohe Reibungstemperaturen nicht auftreten, wurde dem Einflussparameter Prüfapparatur besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Zu hohe Temperaturen können mit Übersteigen der Glasübergangstemperatur des Beschichtungssystems zu einem frühzeitigen, versuchsbedingten Versagen der Probekörper führen. Die Oberflächentemperatur wird stichprobenartig kontrolliert. Während der ersten 5.000 Zyklen erfolgt die Bestimmung der Verschleißbeständigkeit in 1.000 Zyklen-Intervallen, danach in 2.500 Zyklen-Intervallen. Nach Beendigung eines Prüfintervalls erfolgt die Reinigung der Prüfoberfläche. Loser Reifenabrieb und losgelöste Partikel des Oberflächenschutzsystems werden entfernt. Der Reifenabrieb haftet unterschiedlich stark am Oberflächenschutzsystem. Eine sofortige Reinigung der Oberfläche nach Beendigung des Intervalls mit einer Bürste oder einem Tuch erleichtert die Entfernung von Abrieb, da der Reifen bzw. Reifenabrieb durch die Reibungsenergie noch erwärmt und somit weich ist. Mit jedem Erreichen eines Intervalls erfolgt auch eine Aufzeichnung des Verschleißes (siehe Abschnitt 5.2) und die Klassifizierung in verschiedene Verschleißklassen. Ein vorzeitiger Abbruch des kompletten Versuchsprogramm ist möglich, wenn der Probekörper vor Erreichen der 15.000 Zyklen in die höchste Verschleißklasse zugeordnet werden kann.

Die ersten Untersuchungen zur zerstörungsfreien Dokumentation des Verschleißes wurden mithilfe magnetisch-induktiver Schichtdickenmessung durchgeführt (siehe Abschnitt 5.4). Hierbei wurde deutlich, dass bei ca. 90 % der verschleißanfälligen Beschichtungen, der stärkste Tiefenabtrag in den ersten 5.000 Zyklen generiert wurde. Die Untersuchungen wurden an elastischen OS 11a- und OS 11b-Systemen durchgeführt (Abb. 4.3). Dieser anfängliche stärkere Verschleiß wird als Einlauf- bzw. Gleitflächenverschleiß bezeichnet. Die Spannungsspitzen und die Rauigkeit der Oberfläche nehmen während dieses Prozesses ab bis das tribologische System „eingelaufen“ ist. Die Gleitflächen passen sich dabei aneinander an. Es hat sich daher vor allem bei den elastischen Systemen als sinnvoll erwiesen, den Verschleiß im ersten Prüfintervall jeweils nach 1.000 Zyklen zu dokumentieren, um auch den frühzeitigen Verschleiß zu erfassen. In den Versuchen hat sich zudem gezeigt, dass bei den meisten Oberflächenschutzsystemen der Einlaufverschleiß nach 5.000 Zyklen abgeschlossen ist. [Breit et al. - 2015a]

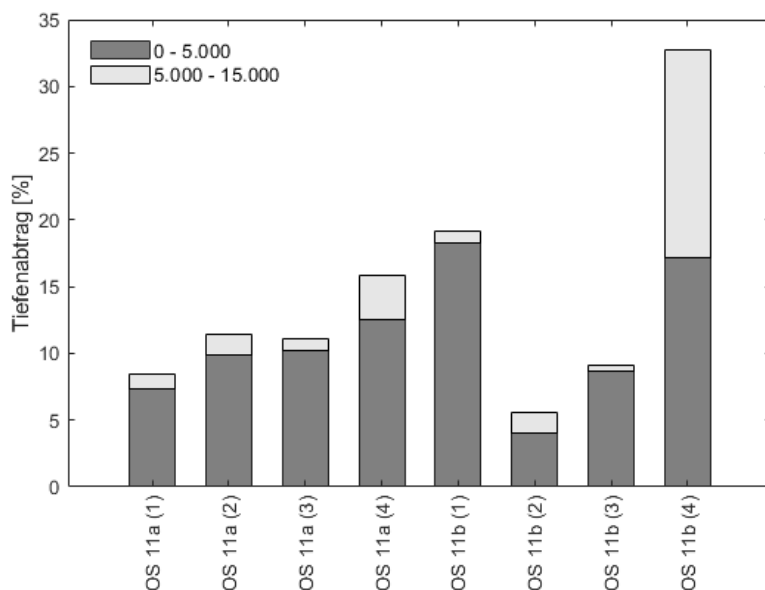


Abb. 4.3: Vergleich Verschleißentwicklung in Abhängigkeit der Zyklenzahl an OS 11a- und OS 11b-Systemen



## **5 Messtechnik**

### **5.1 Allgemeines**

Eine große Schwierigkeit bei der Verschleißdokumentation ist die Oberflächenrauigkeit. Diese erschwert das händische Messen des Tiefenabtrags sehr stark, da Täler und Spitzen dicht beieinanderliegen und die Ergebnisse leicht verfälscht werden können. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die anhaftenden Reifenpartikel sich bei der Reinigung nicht zu 100 % von der Oberfläche entfernen lassen. Bei einer Wägung können die Gewichtsverluste, die im Grammbereich liegen, nicht präzise ermittelt werden. Dies zeigt, dass die Messtechnik ein entscheidendes Prüfmedium zur Aufzeichnung und anschließenden Bewertung des resultierenden Verschleißes bzw. des Verschleißverhaltens ist. Während bei den normativen Prüfverfahren aus Abschnitten 3.5 und 3.6 das Verschleißvolumen durch Wägung oder Tiefenabtrag an einzelnen Messstellen erfasst wird, gibt es weitere, präzisere Möglichkeiten (wie z. B. der flächigen Laseraufzeichnung) die Verschleißbeständigkeit zu beurteilen.

In der Praxis ist die Bohrkernentnahme ein übliches Verfahren, um die applizierten Schichtdicken ermitteln zu können. Auch dieses Verfahren wurde bei den Versuchen mit dem Parking Abrasion Test angewendet. Es diente hauptsächlich zur Validierung der entwickelten zerstörungsfreien Prüfverfahren mittels induktiver Schichtdickenmessung und 2D / 3D-Laserscanning. Der Schwerpunkt in dieser Arbeit lag auf der Entwicklung des letztgenannten Verfahrens, da es ein objektives Verfahren ist, bei dem die Ergebnisse nicht vom „Handling“ des Prüfers abhängig sind. Zusätzlich erfolgte die Verschleißdokumentation mittels visueller Begutachtung und fotografischer Dokumentation, da dies eine erste Einschätzung hinsichtlich der Verschleißstärke erlaubte. Vor allem bei geringen Verschleißstärken war eine Kategorisierung des Verschleißes durch visuelle Begutachtung unabdingbar.

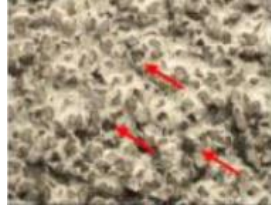
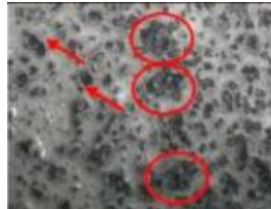
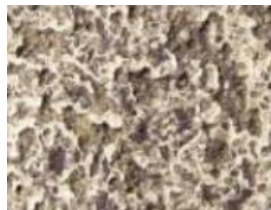
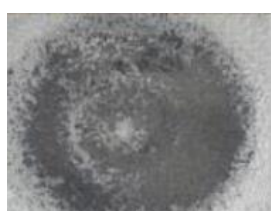

### **5.2 Visuelle Begutachtung und Klassifikation in Verschleißklassen**

Ohne Bestimmung der Restschichtdicke kann die Verschleißdokumentation in erster Linie visuell erfolgen. Hierbei werden Fotos nach Erreichen der einzelnen Prüfstufen aufgenommen. Zusätzlich werden Detailaufnahmen mit Hilfe einer Risslupe erstellt, wodurch einzelne Rissbreiten oder ausgebrochene Körner vermessen werden können.

Eine Klassifizierung der Oberflächenschutzsysteme, in Abhängigkeit von der Verschleißstärke, erfolgt nach Tab. 5.1 [Ladner et al. - 2013a]. Die Verschleißstärke nimmt von Verschleißklasse 1 bis Verschleißklasse 6 zu. Bei Verschleißklasse 1 sind vereinzelt Quarzsandkörner ausgebrochen und die Deckversiegelung über den Kornspitzen ist abgefahren. Eine geringe Abnutzung bzw. geringe Schäden liegen in Verschleißklasse 2 vor, sofern die Deckversiegelung zusätzlich nur punktuell beschädigt ist und die Quarzsandkörner auf einer Fläche mit einem Durchmesser von maximal 10 mm herausgebrochen sind. Die Funktionalität des Systems ist weiterhin gegeben, wenngleich bereits ein optischer Mangel vorliegt. Bei Ausbrüchen der Quarzsandkörner auf einer Fläche mit einem Durchmesser von bis zu 30 mm

und / oder einer großflächig abgefahrenen Deckversiegelung wird das System in Verschleißklasse 3 eingruppiert. Die Funktionalität des Beschichtungssystems ist noch gegeben, die Applikation einer neuen Deckversiegelung zur Aufrechterhaltung der längerfristigen Funktionalität wird empfohlen. Wurde die Verschleißschicht bis zu 50 % abgefahren, so wird von einer starken Abnutzung und einer Klassifizierung in Verschleißklasse 4 gesprochen. Die Funktionalität des Oberflächenschutzsystems kann hier bereits eingeschränkt sein. Bei Abtragstiefen von mehr als 50 % der Verschleißschicht liegt eine sehr starke Abnutzung und Verschleißklasse 5 vor. Die Funktionalität des Beschichtungssystems kann dann nicht mehr garantiert werden. Ist auch die Schwimmschicht beschädigt, so ist von einem vollständigen Systemausfall auszugehen und das System ist in Verschleißklasse 6 einzuordnen.

Tab. 5.1: Klassifizierung der Oberflächen durch visuelle Begutachtung nach der Verschleißbeanspruchung ([Ladner et al. - 2013a], [Ladner et al. - 2013b], [Breit et al. - 2015a])

Verschleiß- klasse	Einstufung	Beschreibung	Beispiel
VK 1	Sehr geringe Abnutzung	Deckversiegelung über Kornspitzen abgefahren bzw. vereinzelte Quarzsandkörner herausgebrochen	
VK 2	Geringe Abnutzung	Deckversiegelung über Kornspitzen abgefahren und punktuell beschädigt bzw. Quarzsandkörner kleinflächig bis Ø 10 mm zusammenhängend herausgebrochen	
VK 3	Mittlere Abnutzung	Deckversiegelung großflächig abgefahren bzw. Quarzsandkörner kleinflächig bis Ø 30 mm zusammenhängend herausgebrochen	
VK 4	Starke Abnutzung	Abtrag der Deckversiegelung und Verschleißschicht mit Abtragstiefen ≤ 50% der ursprünglichen Schichtdicke (bzw. Mindestschichtdicke) der Verschleißschicht	
VK 5	Sehr starke Abnutzung	Sehr starker Abtrag der Verschleißschicht mit Abtragstiefen > 50% der ursprünglichen Schichtdicke (bzw. Mindestschichtdicke) der Verschleißschicht	
VK 6	Systemausfall	Beschädigung der Schwimmschicht	

Die Eingruppierung in die Verschleißklassen 1 bis 3 ist mittels visueller Begutachtung möglich. Spätestens ab Verschleißklasse 4 ist eine Ermittlung der Verschleißstärke bzw. -tiefe durch Lasermessung oder an Bohrkernproben (Abschnitt 5.3) zusätzlich notwendig. Nachfolgend ist die Dokumentation der visuellen Begutachtung am Beispiel eines OS 11b-Systems dargestellt (Abb. 5.1). In diesem Fall wurde die Deckversiegelung komplett abgetragen und die Verschleißschicht auch großflächig beschädigt, weshalb das geprüfte Oberflächenschutzsystem der Verschleißklasse 5 zugeordnet wurde (Tab. 5.1).

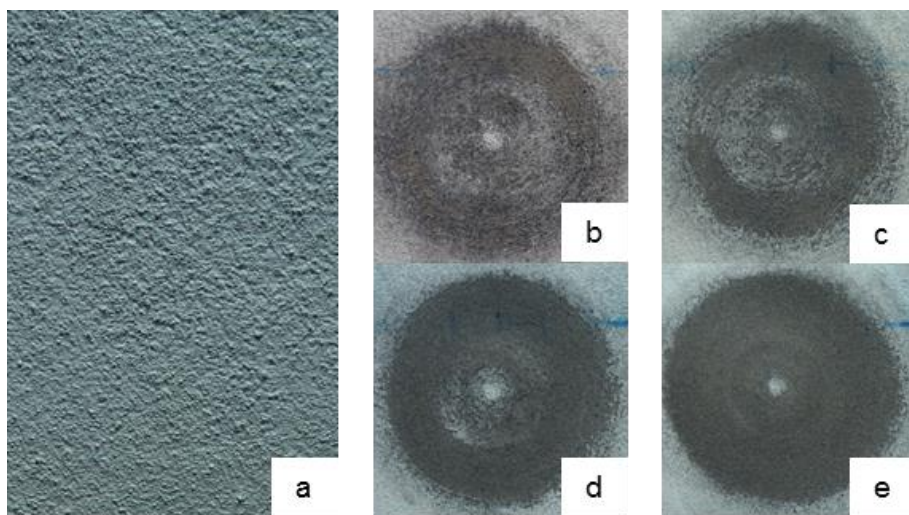


Abb. 5.1: Dokumentation der visuellen Begutachtung nach Verschleißbeanspruchung mit dem Parking Abrasion Test am Beispiel eines OS 11b-Systems (a) 0 Zyklen (VK 1), b) 1.000 Zyklen (VK 4), c) 3.000 Zyklen (VK 5), d) 5.000 Zyklen (VK 5), e) > 10.000 Zyklen (VK 5)

Die Beurteilung der Verschleißstärke anhand einer visuellen Begutachtung ist abhängig von der subjektiven Bewertung des Prüfers. Objektiv kann die Verschleißstärke, wie nachfolgend in den Abschnitten 5.3 bis 5.5 beschrieben, erfasst werden. Ist die Deckversiegelung großflächig und visuell erkennbar abgefahren, und überschreitet die maximal zulässigen Verschleißtiefen aus Tab. 5.2 nicht, so ist das System in Verschleißklasse 4 einzuordnen. Die in Tab. 5.2 genannten maximal zulässigen Verschleißtiefen bis Verschleißklasse 4 entsprechen 50 % der Mindestdichtdicke der Deckschicht bzw. Gesamtschichtdicke.

Tab. 5.2: Maximal zulässige Verschleißtiefe je Systemaufbau bis Verschleißklasse 4 bezogen auf die Mindestdichtdicke

	OS 8	OS 11a	OS 11b	OS 13	OS 10 / 14
Max. zul. Verschleißtiefe [mm]	1,25	1,50	2,00	1,25	2,00

### 5.3 Zerstörende Ermittlung der Verschleißstärke anhand von Bohrkernproben

Das gängigste Verfahren zur Bestimmung von Abtragstiefen erfolgt analog an Feinschnitten von Bohrkernproben mit einem Durchmesser von 25 mm. Hierfür werden Bohrkernproben zu Beginn an einer unbelasteten Stelle und mit Beendigung der Versuche an der optisch am stärksten beanspruchten (verschlissenen) Stelle entnommen. Die Schichtdicken werden an zehn gleichmäßig über die Fläche des Feinschnitts verteilten Stellen ermittelt und anschließend gemittelt. Die Differenz der beiden gemittelten Schichtdicken, in Abb. 5.2 symbolisch durch die roten Pfeile angegeben, ergibt die Abtragstiefe  $A_{BK}$ . Die Abtragstiefe  $A_{BK}$  kann auf 0,1 mm angegeben werden.

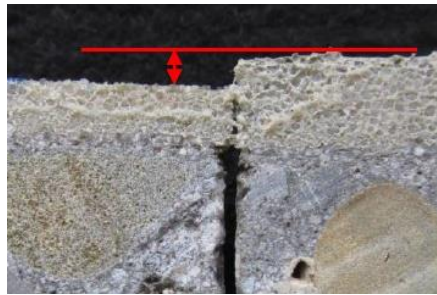


Abb. 5.2: Beispiel zur Ermittlung der Abtragstiefe  $A_{BK}$  einer Bohrkernprobe an einem OS 11b-System aus der Differenz (rote Pfeile) der Schichtdicke (links: nach Verschleißbeanspruchung, rechts: ohne Verschleißbeanspruchung)

Die Schichtdicken am Gesamtsystem werden für OS 8- und OS 13-Systeme, für OS 11- und OS 14-Systeme an der hwO bestimmt ([DAfStb - 2001], [DAfStb - 2016]). Weiterhin ist dabei zu beachten, dass bei den Gesamtschichtdicken die Deckversiegelung in der Deckschicht enthalten ist (ohne herausstehende Körner). Die erforderlichen Auftragsmengen der einzelnen Schichten sind in den Produktdatenblättern der Hersteller angegeben, sodass der Materialauftrag in Abhängigkeit von der Rauigkeit des Untergrunds (bei der Grundierung) und zur Gewährleistung der Rutsicherheit (bei der Deckversiegelung) erfolgt. Gleichzeitig führt dies dazu, dass der Auftrag der Deckversiegelung über den Kornspitzen der Abstreuerung sehr gering ist. Deutlich erkennbar ist dies an den mikroskopischen Aufnahmen in Abb. 5.3 und Abb. 5.4, jeweils vor und nach der Prüfung. Die Deckversiegelung über den Kornspitzen ist i. d. R. nach wenigen Zyklen abgetragen.

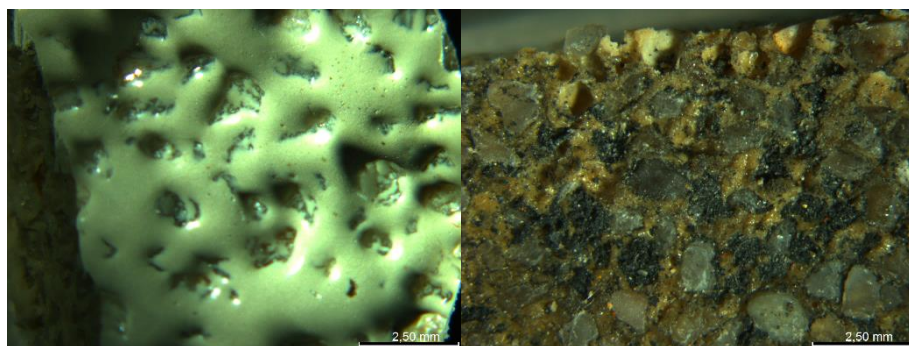


Abb. 5.3: Draufsicht OS 11b-System vor (links) und nach (rechts) der Prüfung mit dem Parking Abrasion Test

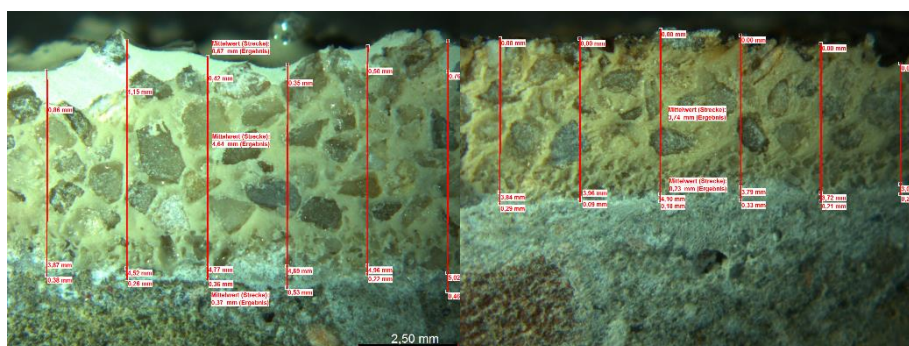


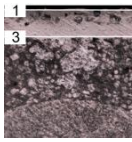
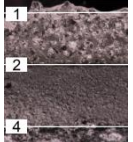
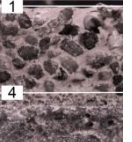
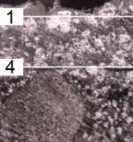
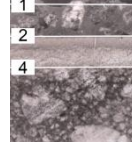
Abb. 5.4: Schichtdicken an einem OS 11b-System vor (links) und nach (rechts) der Prüfung mit dem Parking Abrasion Test

Es ist jedoch auch möglich die Einzelschichtdicken zu bestimmen. Dies erfolgt analog zum Gesamtsystem. In Tab. 5.3 sind die zu beachtenden Begrenzungen bei der Bestimmung der Einzelschichtdicken an Bohrkernproben für die einzelnen Oberflächenschutzsysteme erläutert. Die obere Begrenzung wird bei allen Systemen oberhalb der Deckversiegelung festgelegt. Herausstechende Körner bleiben dabei unberücksichtigt. Die untere Begrenzung erfolgt – mit Ausnahme des OS 8-System – oberhalb der Grundierung. Beim OS 11a- und OS 14-System gibt es neben der oberen und unteren Begrenzung noch eine zusätzliche mittlere Begrenzung für Schwimmschicht.

Bei der Auswertung der Messergebnisse zeigte sich, dass die Resultate auch hier vom Prüfer mit abhängig sind. Eine kleine Schiefstellung der Probekörper kann zu unterschiedlichen gemessenen Schichtdicken führen. Weiterhin zeigte sich, dass es nicht möglich ist nach verschiedenen Intervallen Bohrkernproben zu entnehmen. Zum einen ist die stärkste verschlissene Stelle „entfernt“, zum anderen verstärkt sich der Verschleiß entlang der Bohrkernprobenränder. Dies veranlasste die Entwicklung zerstörungsfreier Schichtdickenmessungen für Oberflächenschutzsysteme, die in den nachfolgenden Abschnitten erörtert wird.



Tab. 5.3: Begrenzungen zur Ermittlung von Einzelschichtdicken von Oberflächenschutzschichten an Bohrkernproben

Oberflächen-schutz-systeme	OS 8	OS 11a	OS 11b	OS 13	OS 14
					
obere Begrenzung	Über Deckversiegelung jedoch ohne herausstehende Körner (1)				
mittlere Begrenzung	-	Zwischen Schwimm- und Verschleißschicht (2)	-	-	Zwischen Schwimm- und Verschleißschicht (2)
untere Begrenzung	Über der Betonoberfläche einschließlich der Grundierung (3)	Über den Kornspitzen der abgesandeten Grundierung (4)			

## 5.4 Zerstörungsfreie magnetisch-induktive Schichtdickenmessung

### 5.4.1 Allgemeines

Für die Durchführbarkeit einer magnetisch-induktiven Schichtdickenmessung ist es im Vorfeld notwendig, bündig mit der abgestrahlten Oberfläche, Metallstreifen oder -plättchen an die Stelle einzubauen, an der später der Verschleiß bestimmt werden soll. Bei der Prüfung wird ein magnetisches Feld zwischen dem Messfühler und dem eingebauten Metall erzeugt, das in Abhängigkeit von der Schichtdicke seine Eigenschaften verändert. Diese Änderung wird anschließend vom Messgerät in die dazugehörige Schichtdicke umgerechnet. Vor Durchführung einer Messung ist es notwendig, eine Kalibrierung an einem nicht beschichteten Metallstück durchzuführen. Aufgrund der Rauheit der Oberfläche ist es zusätzlich wichtig, dass die Messung immer an der gleichen Stelle erfolgt, da sonst die gemessenen Ergebnisse anschließend nicht in Abhängigkeit von der Zyklenzahl verglichen werden können. Analog zur Bohrkernentnahme erfolgt die Dokumentation der zerstörungsfreien

Abtragstiefen  $A_L$  (Differenz aus ursprünglicher Schichtdicke und Restschichtdicke) mit einer Genauigkeit von 0,1 mm [Breit et al. - 2015a].

#### 5.4.2 Auswertung / Beispiel

In Abb. 5.5 ist das Schichtdickenmessgerät Elcometer 456 dargestellt. Dieses verfügt über eine separate Sonde mit einer Auflösung von 1  $\mu\text{m}$  bei einer Tiefenmessung von 0 bis 1 mm bzw. 10  $\mu\text{m}$  bei einer Tiefe von 1 bis 5 mm. Je nach Einstellung sind auch Dicken von bis zu 30 mm messbar. Zusätzlich speichert es die letzten 1.500 Messwerte, die zur weiteren Auswertung per USB-Verbindung auf einen Computer übertragen werden können. Es wurde eine Messschablone angefertigt, die gewährleistet, dass die Messungen immer an der gleichen Stelle durchgeführt und nicht durch die Oberflächenrauheit beeinflusst werden. Die Schichtdickenmessungen werden an fünf Messstellen im Anschluss an die visuelle Begutachtung durchgeführt. Die beiden äußeren Messstellen (Abb. 5.5) liegen in einem weniger stark verschlissenen Bereich, bei der mittleren Messstelle tritt der stärkste Verschleiß auf.



Abb. 5.5: Darstellung der magnetisch-induktiven Schichtdickenmessung mit Messschablone

Beispielhaft ist die Auswertung für ein OS 11b-System in Abb. 5.6 dargestellt (siehe auch [Breit et al. - 2015b]). Die Verschleißbelastung erfolgte mithilfe des Parking Abrasion Tests. Auf der x-Achse sind die fünf Messstellen aufgetragen, auf der y-Achse die Gesamtschichtdicke (prozentual). An der zweiten y-Achse wurde zusätzlich die Zyklenanzahl angegeben. An einer im Vorfeld entnommenen Bohrkernprobe war abmessbar, dass die Dicke der Deckversiegelung bis ca. 10 % des Gesamtaufbaus des Beschichtungssystems beträgt (gestrichelte Linie). An diesem Beispiel wird deutlich, dass die Systeme z. T. nur über einen kurzen Zeitraum robust gegenüber Verschleißbeanspruchungen sind. Bereits nach 5.000 Zyklen ist die Deckversiegelung abgetragen und es findet ein Schichtdickenabtrag in der Verschleißschicht statt, der kontinuierlich weiter voranschreitet.



Zu beachten ist bei diesem Verfahren, dass aufgrund der im Vorfeld zu definierenden Messstellen, der Verschleiß nicht zwangsläufig an der Stelle mit dem höchsten Verschleiß dokumentiert wird.

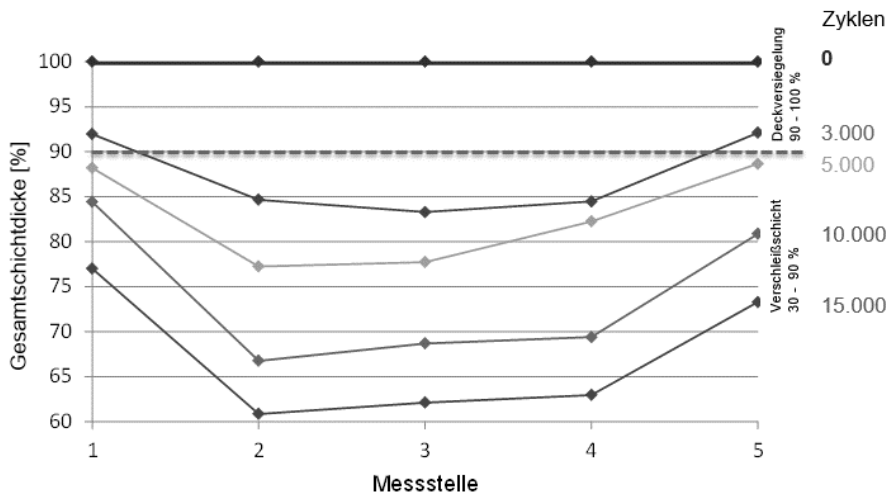


Abb. 5.6: Auswertebispiel einer Schichtdickenmessung über die prozentuale Gesamtschichtdicke und der Zyklenanzahl an einem OS 11b-System mit einem induktiven Messverfahren an 5 Messstellen

## 5.5 Zerstörungsfreie Schichtdickenmessung per 2D / 3D-Laserscanning

### 5.5.1 Allgemeines

In Kombination mit der visuellen Begutachtung wurde der Verschleiß mit einem Laser aufgezeichnet. Bei der 2D / 3D-Laserscanning-Methode wird die Oberfläche von der Oberseite abgetastet. Notwendig sind hierfür entweder ein mobiler x-y-Tisch mit dem die Probe unterhalb des Lasers verschoben wird oder ein mobiler Laser, der die Oberfläche abfährt. Es ist prinzipiell möglich mit dem Laser eine beliebig lange Strecke über eine Breite von 240 mm aufzuzeichnen. Der im Rahmen der Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Kaiserslautern entwickelte, mobile Prüfrahm hat eine Messlänge von 500 mm. Dieser ermöglicht es auch vor Ort in einem Parkbau Verschleißtiefen zu ermitteln. Als Laser wurde der Halbleiter-Laser LJ-V7300 der Firma Keyence verwendet. Der blaue Laserstrahl besitzt eine hohe Genauigkeit und hat seinen Ursprung in der Medizintechnik. Die Laserstrahlbreite beträgt 610  $\mu\text{m}$ . Die Wiederholgenauigkeit liegt in z-Richtung (Höhe) bei 5  $\mu\text{m}$  und in x-Richtung (Breite) bei 60  $\mu\text{m}$  (Herstellerangaben).

Die Tiefenmessung erfolgt zweidimensional. Aufgezeichnet werden über den Laser die x- und z-Koordinaten. Die Messgenauigkeiten betragen 5  $\mu\text{m}$  in x-Richtung und 0,4  $\mu\text{m}$  in z-Richtung. Ein dreidimensionales Bild ergibt sich aus der Laufrichtung des Lasers in y-Richtung (Abb. 5.7). In z-Richtung wird die Abtragstiefe, in x- und y-Richtung die

Fläche aufgezeichnet. Die Abtragstiefe  $A_L$  wird ebenfalls wie die Abtragstiefe  $A_{BK}$  aus der Höhendifferenz gebildet und auf 0,1 mm angegeben.

Über die Software des Lasers werden die Messdaten aufgezeichnet. Parallel ist es möglich am Computer Live-Bilder der Aufzeichnungen zu verfolgen. Eine direkte rechnerische Auswertung ist mit der Lasersoftware nicht möglich. Die aufgezeichneten Werte werden daher in einer csv-Datei gespeichert, die anschließend mit einem in MATLAB geschriebenen Programm ausgewertet werden kann. MATLAB ist eine Software von The MathWorks für numerische Berechnungen, bei denen Matrizen die Grundelemente bilden.

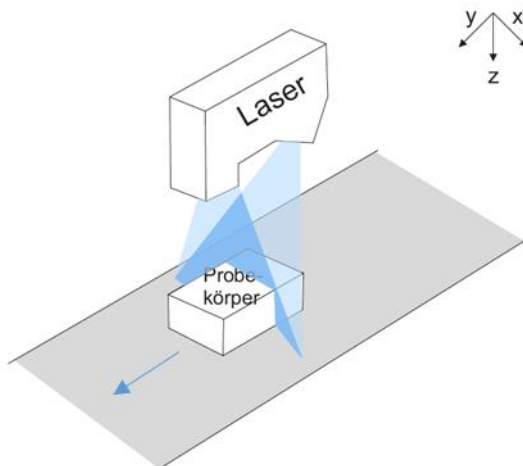


Abb. 5.7: Schematische Darstellung der Funktionsweise des eingesetzten 2D /3D-Lasers

Alle csv-Dateien vom Nullzustand bis zur letzten Prüfung sind für die Auswertung in MATLAB einzulesen. Die Matrix hat i. d. R. die Abmessungen von 800 x 800 Messpunkten, was einem Messbereich von 220 mm x 220 mm (Radaufstandsfläche ca. 145 mm x 145 mm) entspricht. Aus der Aufzeichnung der Messwerte können Fehlmessungen im Randbereich resultieren. Diese werden sichtbar durch den Wert „-999“. Daher ist nach dem Einlesen der Dateien der Auswertebereich auszuwählen, die Fehlmessungen werden in diesem Schritt angezeigt. Anschließend werden die Visualisierungen (Mode 1: Seitenansicht, Mode 2: Draufsicht, Mode 3: Seitenansicht und Draufsicht) sowie 3D-Darstellungen von jedem Zyklus erzeugt und gespeichert.

Drei Auswerteverfahren wurden entwickelt: maximale Verschleißtiefe, Tiefenabtrag am Querschnitt in Plattenmitte und Volumenabtrag über die Gesamtfläche. Für die Auswertung der maximalen Verschleißtiefe können beliebig viele Stellen per Augenschein am Computer ausgewählt werden. Aus diesen wird ein Mittelwert gebildet und in einem Diagramm der Tiefenabtrag für jedes Prüfintervall dargestellt. Zu wählen sind mindestens zwei Prüfstellen, empfohlen werden mindestens fünf. Punktuell wurden diese Ergebnisse auch mit Bohrkernproben verglichen, die an der gleichen Stelle nach Versuchsende entnommen wurden. Für die Auswertungen „Querschnitt in Plattenmitte“ und „Volumenabtrag“ ist kein Bereich separat

auszuwählen. Beim Querschnitt in Plattenmitte wird exakt über die Mitte der Tiefenabtrag dargestellt, beim Volumenabtrag wird über die Gesamtfläche das abgetragene Verschleißvolumen ermittelt.

Für die einfachere Auswertung des Schichtdickenabtrags mit einem Vergleichspunkt ist ein unbelasteter Randbereich von Vorteil. Bei der Aufzeichnung des Verschleißes können Schiefstellungen vorliegen. Diese resultieren aus einer Schiefe des Betongrundkörpers, aus Beschichtungsvorgängen oder auch durch den Laser und erschweren die Auswertung im Nachgang. Kleinere Schiefstellungen, die für das menschliche Auge während der Aufzeichnung nicht sichtbar sind, zeigen sich anschließend auf dem aufgezeichneten Bild. In unbelasteten Randbereichen werden daher Matrizen mit einer Größe von 50 x 50 Messpunkten definiert und deren durchschnittliche Höhe ermittelt. Die Höhenbereiche dieser Matrizen werden verglichen und bei Bedarf eine lineare Steigungsmatrix in x- und y-Richtung überlagert. Veranschaulicht bedeutet eine Schiefstellung von 1 mm bei einem Messbereich von 220 mm x 220 mm bereits eine Steigung von 4 %, die einen Einfluss auf die Verschleißdarstellung hat. Da ein manueller Ausgleich dieser Schiefstellung vorab nicht möglich ist, wurde das Auswerteprogramm in MATLAB entsprechend angepasst, das die Steigung ermittelt und anschließend im Programmialgorithmus ausgleicht ohne die Messdaten zu verfälschen. Die Beschreibung der Auswertung kann auch Anhang B entnommen werden.

### 5.5.2 Beispielhafte Auswertung

Für die Auswertung in MATLAB wurde ein Auswerteverfahren entwickelt, das die Erstellung von Querschnitts-, Verschleißtiefen- und Volumendiagrammen ermöglicht. Zusätzlich werden einheitliche 3D-Darstellungen und Draufsichten erstellt. In den Diagrammen können weiterhin die linearen Regressionen und die dazu zugehörigen Bestimmtheitsmaße  $R^2$  angegeben werden. Ein lineares Modell wird vereinfacht angenommen, wenngleich es auch vereinzelt zu un stetigen (i. d. R. nicht erklärbaren) und asymptotisch gegen einen Endwert laufende Verläufe gibt. Verläuft der Verschleiß gegen einen Endwert, so kann entweder davon ausgegangen werden, dass kein weiterer nennenswerter Verschleiß entsteht, da das System „eingelaufen“ ist oder bereits der Verschleiß (bei einem System mit Schwimmschicht) so stark ist, dass die Schwimmschicht erreicht wurde. Dies lässt sich zum einen anhand der Verschleißtiefe als auch optisch (visuell) eindeutig erkennen. Die lineare Regression wird über Gleichung (5.1) angegeben:

$$y=ax+b \quad (5.1)$$

mit:	$y$	y-Wert, Funktionswert, abhängige Variable
	$a$	Steigung
	$x$	x-Wert, (Funktions-)Argument, unabhängige Variable
	$b$	Schnittpunkt der y-Achse

Das Bestimmtheitsmaß gibt an, wie stark die lineare Regression mit den Messwerten korreliert und berechnet sich nach Gleichung (5.2):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\text{erklärte Varianz}}{\text{Gesamtvariation}} \quad (5.2)$$

mit:	$n$	Anzahl der Messwerte
	$\hat{y}_i$	Mittelwert gemäß der linearen Regression
	$\bar{y}$	Mittelwert parallel zur x-Achse
	$y_i$	Messwerte

Tendiert die Steigung der linearen Regression gegen 0, so ist der Wert für das Bestimmtheitsmaß i. d. R. auch niedrig. Minimale Abweichungen der Messwerte bzgl. der linearen Regression machen sich dann im Bestimmtheitsmaß sehr deutlich bemerkbar. Das Bestimmtheitsmaß ist daher nur bei Proben von Interesse, die einem größeren Verschleiß unterliegen. Eine sehr gute Korrelation liegt vor, wenn  $R^2$  bei mindestens 0,85 liegt. Dann kann von einem linearen Verschleißverhalten ausgegangen werden. Bei Materialien, bei denen kein Tiefenabtrag messbar ist, also kein Verschleiß entsteht, liegt das Bestimmtheitsmaß oftmals bei einem Wert von unter 0,20. Hier ist die Abweichung zur Regression verhältnismäßig hoch. Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass das Modell nicht geeignet ist, sondern vielmehr, dass es sich um ein verschleißrobustes Oberflächenschutzsystem handelt.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen hat sich gezeigt, dass der Verschleiß bei einigen Probekörpern schneller voranschreitet (Einlaufverschleiß) und die Verschleißgeschwindigkeit mit steigender Anzahl der Zyklen abnimmt. Daher wurde der Verschleiß zu Beginn alle 1.000 Zyklen aufgezeichnet. Bei Systemen die zu nennenswertem Verschleiß neigen, wurden analog dazu zusätzlich die linearen Regressionen und die Bestimmtheitsmaße zum einen von 0 bis 5.000 Zyklen ( $R_1^2$ ) sowie von 5.000 bis 15.000 Zyklen ( $R_2^2$ ) ermittelt bzw. über die gesamte Zyklenanzahl ( $R^2$ ) (siehe Abb. 5.8). Die Ergebnisse der optisch am stärksten verschlissenen Stelle werden als Tiefenabtrag über die Anzahl der Zyklen angegeben.

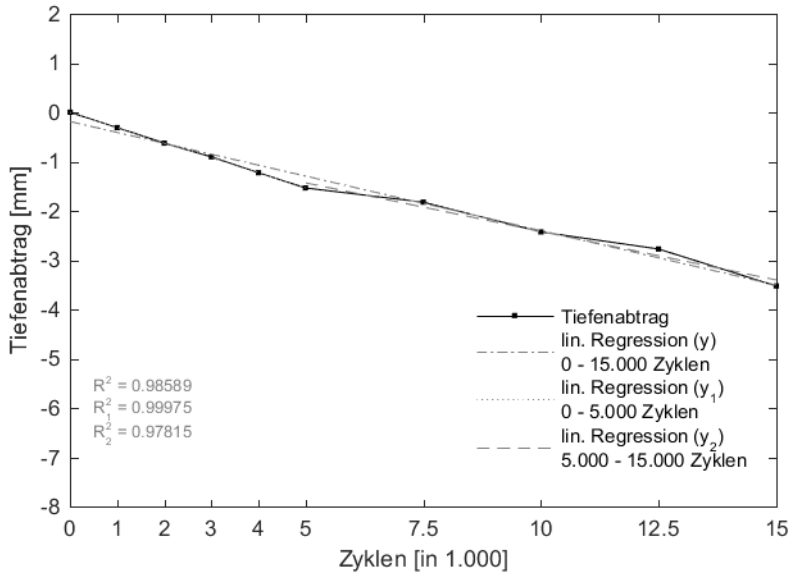


Abb. 5.8: Maximale Verschleißtiefe am Beispiel von P1\_PAT über 15.000 Zyklen unter Angabe der linearen Regressionen

Der Querschnittsverlauf in Probenkörpermitte (Abb. 5.9) wird nach 0, 5.000, 10.000 und 15.000 Zyklen über die Höhe (Verschleißtiefe) in mm angegeben. Hier wird deutlich, dass der Verschleiß nicht gleichmäßig über die gesamte Fläche verläuft, sondern dass (bei Systemen mit einer ausgeprägten Verschleißneigung) im Drehpunkt (Rotationsgeschwindigkeit ist hier Null) ein geringerer (siehe Kurve nach 15.000 Zyklen in Abb. 5.9) bzw. ggf. auch kein sichtbarer Materialabtrag entsteht. Deutlich sichtbar wird der unterschiedlich über die Fläche verlaufende Verschleiß auch in den 2D- bzw. 3D-Bildern des Lasers (Tab. 5.4), während an den reinen Fotoaufnahmen der Reifenabrieb in der Sichtbarkeit dominiert (Tab. 5.5). Bei verschleißarmen Systemen hat es sich als sinnvoll erwiesen, den Punkt der maximalen Verschleißtiefe visuell auszuwählen, da aufgrund der Rautiefe (den systembedingten „Spitzen“ und „Tälern“) falsche Punkte ausgewertet werden können.

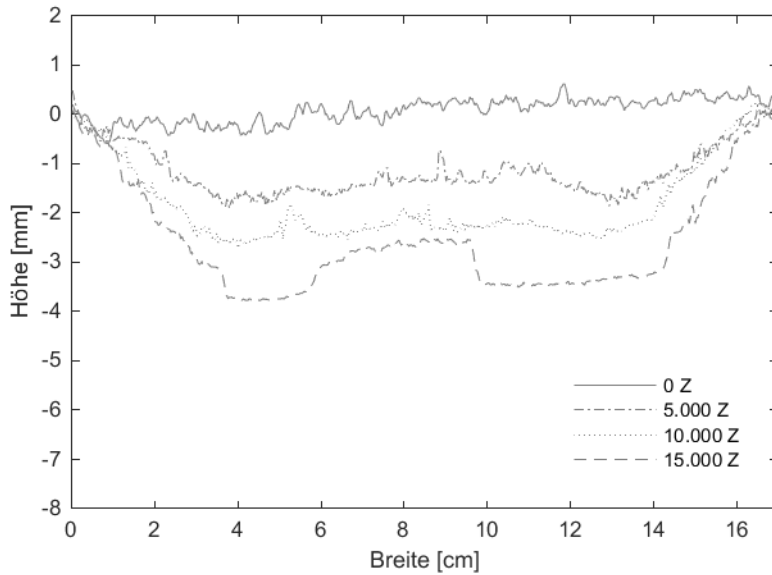
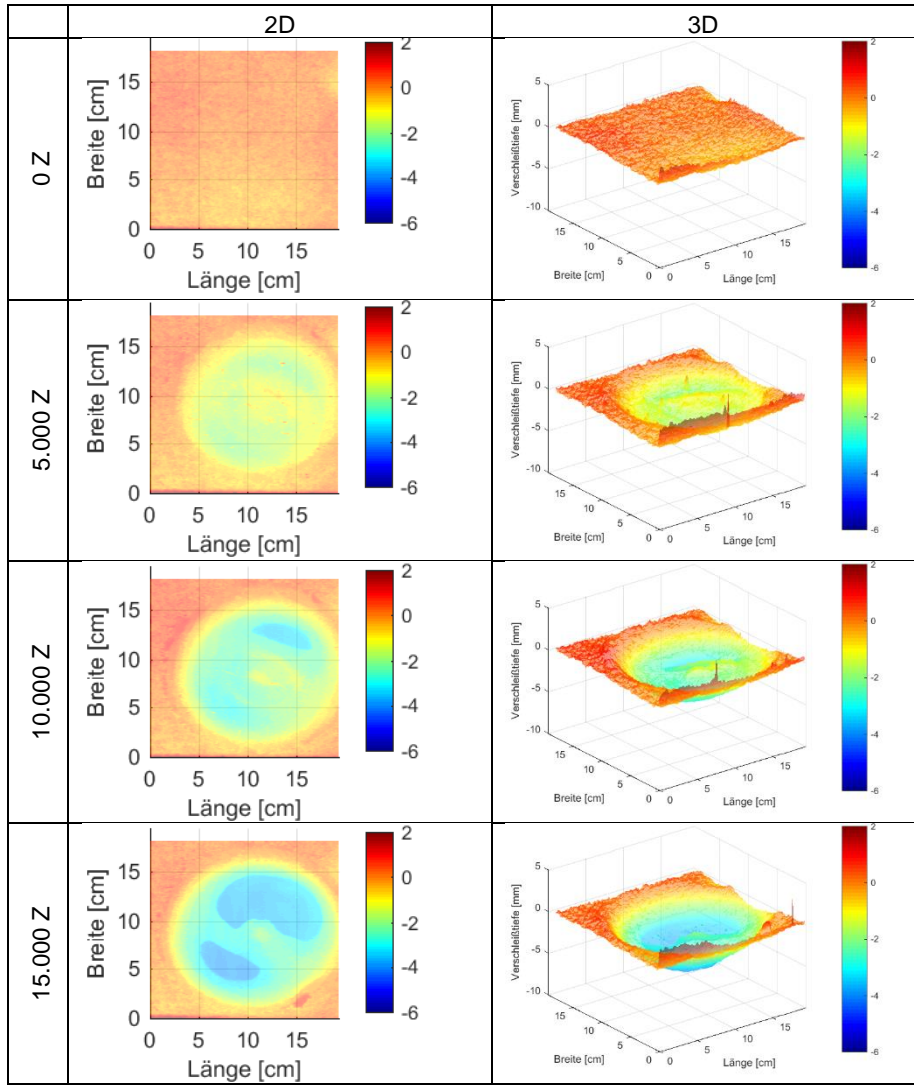

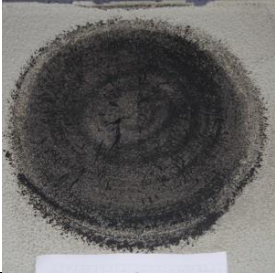




Abb. 5.9: Tiefenabtrag am Querschnitt in Plattenmitte am Beispiel von P1\_PAT über 15.000 Zyklen

Tab. 5.4: P1\_PAT: Laserauswertung 2D bzw. 3D



Tab. 5.5: P1\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z				5.000 Z
10.000 Z				15.000 Z

Der Volumenabtrag ist eine weitere Möglichkeit die Verschleißstärke zu bestimmen. Bei einem positiven Volumenabtragswert liegt ein tatsächlicher Volumenabtrag vor. Bei einem negativen Volumenabtragswert wurde die Schichtdicke durch Reifenabrieb, der sich nicht mehr entfernen ließ, beeinflusst bzw. verfälscht (erhöht). Ein realer Volumenabtrag hat in diesem Falle nicht stattgefunden. Der Volumenabtrag wird über die gesamte auszuwertende Fläche bestimmt und nach 0, 5.000, 10.000 und 15.000 Zyklen angegeben (Abb. 5.10). Die Menge des Volumenabtrags wird in  $\text{cm}^3$  angegeben. Bis zu einem Volumenabtrag von  $10 \text{ cm}^3$  entspricht dies den Verschleißklassen 1 bis 2. Die optische Einstufung in die Verschleißklassen 3 und 4 ist bis zu einem Volumenabtrag von  $25 \text{ cm}^3$  möglich. Höhere Volumenabträge nach 15.000 Zyklen führen zu einem großflächigen Verschleiß wie in diesem Beispiel (Verschleißklassen 5 und 6). Ein großflächiger Volumenabtrag ist auch deutlich visuell sichtbar (Tab. 5.5).



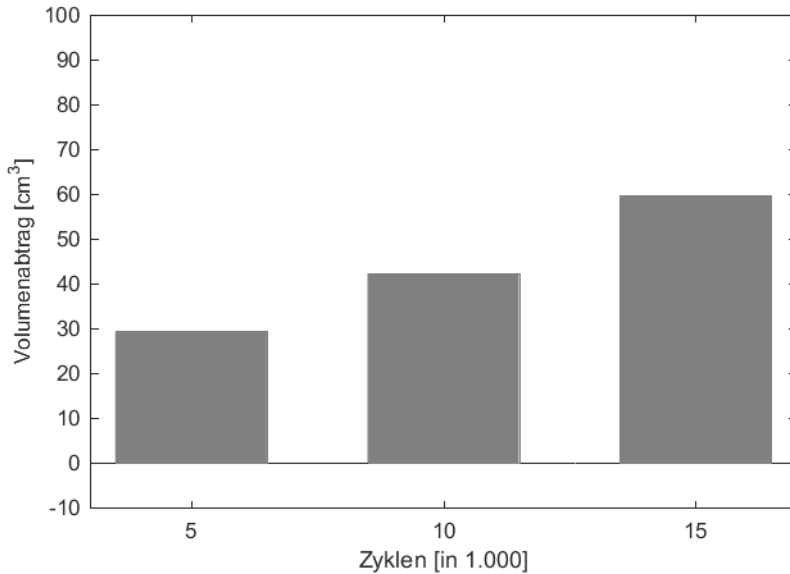


Abb. 5.10: Volumenabtragsentwicklung beim Parking Abrasion Test über 15.000 Zyklen am Beispiel von P1\_PAT

## 5.6 Bewertung der Messtechnik

Die visuelle Begutachtung / Dokumentation des Verschleißes ist keine objektive Methode, um den Verschleiß zu bewerten. Die Beurteilung ist subjektiv vom jeweiligen Betrachter geprägt und die anschließende Klassifizierung entsprechend davon abhängig. Genaue Ergebnisse können bei dieser Dokumentation daher nur in definierten Grenzen erwartet werden. Jedoch kann mit dieser Variante bereits festgestellt werden, in welcher Schicht der Verschleiß stattfindet.

Anhand von Bohrkernproben können sowohl die Gesamt- als auch Einzelschichtdicken unter dem Mikroskop vermessen werden. Zwischenzeitliche Entnahmen von Bohrkernproben an der optisch am stärksten verschlissenen Stelle haben sich nicht bewährt, da bei Versuchsfortsetzung an der Bohrkernkante der Verschleiß deutlich zunahm. Dies führt dazu, dass lediglich zu Beginn und zum Ende eine Schichtdickenbestimmung über Bohrkernproben erfolgen kann. Eine Auswertung in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl ist damit nicht darstellbar. Weiterhin ist eine Schichtdickenmessung abhängig vom Betrachtungswinkel bzw. der Lage der Probe unter dem Mikroskop, was zu Messungenauigkeiten führen kann. Die mikroskopische Untersuchung hat jedoch den Vorteil gegenüber den anderen Verfahren, dass einzelne Systemschichtdicken ermittelt werden können.


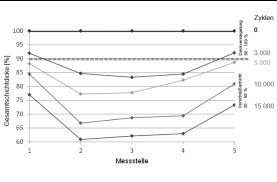
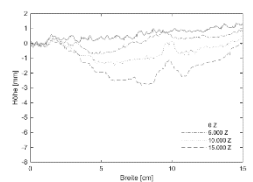
Die magnetisch-induktive Schichtdickenmessung liefert präzise Resultate. Zur Durchführung solcher Untersuchungen ist es jedoch unabdingbar im Vorfeld Metallplättchen bündig zur abgestrahlten Betonoberfläche vor der Beschichtung einzubauen. Dies ist aufwendig sowohl in der Herstellung als auch in der Versuchsdurchführung. Aufgrund der Rauheit (Messung im „Tal“ und auf Kornspitzen)

des Beschichtungssystems ist eine Messschablone notwendig, damit die Messung immer an der gleichen Stelle nach jedem Intervall wiederholt werden kann.

Die Schichtdickenmessung mit dem 2D / 3D-Laser generiert ein hohes Datenvolumen, das mit MATLAB anschließend ausgewertet wird. Vor allem für die Schichtdickenmessung im Parkbau ist zusätzlich zu beachten, dass für die Auswertung eine unbelastete Stelle im Randbereich notwendig ist (Referenzpunkt des Beschichtungssystems). Dieses Verfahren ist das genaueste Verfahren, bei dem zusätzlich eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

Nachfolgend sind in Tab. 5.6 die Verfahren zur Bestimmung der Verschleißtiefe gegenüber gestellt. Mit allen drei Verfahren konnten die gleichen Abtragsstärken ermittelt werden. Bei beiden zerstörungsfreien Prüfmethoden ist eine objektive Verschleißdokumentation in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl möglich. Ein Volumenverschleiß ist jedoch nur mit der 2D / 3D-Laserscanning-Methode möglich. Ein Nachteil zerstörungsfreier Prüfverfahren besteht darin, dass nicht die einzelnen Schichtdicken eines Systems erfasst werden können, sondern nur der ganze Schichtaufbau ermittelt wird. Durch eine zusätzliche Bohrkernentnahme können aber Rückschlüsse auf die einzelnen Schichten gezogen werden. Prinzipiell sind alle drei Verfahren geeignet, die Verschleißtiefen zu ermitteln. Es wird daher empfohlen, den Verschleiß mit dem 2D / 3D-Laserscanningverfahren aufzuzeichnen und zusätzlich bei Bedarf die Einzelschichtdicken an einer Bohrkernprobe zu ermitteln.

Tab. 5.6: Vergleich der verschiedenen Prüfverfahren zur Schichtdickenmessung über die Abtragstiefen an einem mit dem Parking Abrasion Test geprüften OS 11b-System

Bohrkernprobe	Magnetisch-induktive Schichtdickenmessung	2D / 3D-Laserscanning
		
2,70 mm	2,71 mm	2,76 mm

## **6 Evaluierung des Prüfstandes an marktüblichen Oberflächenschutzsystemen**

### **6.1 Allgemeines**

Mit dem Parking Abrasion Test wurde ein Prüfverfahren entwickelt, das eine realitätsnahe Verschleißbeanspruchung mit PKW-Reifen von polymeren Beschichtungen in Parkbauten darstellt. Es wurden unterschiedliche Verschleißklassen definiert, sodass eine Klassifizierung der Beschichtungssysteme möglich ist [Breit et al. - 2015a]. Eine Beurteilung hinsichtlich der Verschleißtiefe und des Volumenabtrags ist möglich.

Bei der Auswertung der maximalen Verschleißtiefe können unterschiedliche Verschleißentwicklungen klassifiziert werden. Müssen sich Verschleiß- und Reibungspartner mit fortschreitender Zyklenanzahl aneinander anpassen (i. d. R. elastische Systeme), ist mit einer höheren Verschleißgeschwindigkeit (einem stärkeren Abtrag) zu rechnen, bis das tribologische System „eingelaufen“ ist. Dies kann dahingehend passieren, dass sich die Rauigkeit eines Reibpartners verringert oder sich ein Zwischenstoff aus den Reibpartnern bildet (Haftung des Reifenabriebs am Beschichtungssystem). Anschließend werden sich mit Erreichen des Einlaufverschleißes die Reibkräfte verringern und die Verschleißgeschwindigkeit abnehmen. Liegen von Anfang an reibungsarme Randbedingungen vor, wird der Verschleiß bzw. die Verschleißgeschwindigkeit konstant über die Versuchsdauer sein. Entstehen im System vorwiegend elastische Verformungen, so ist zu Beginn kein Verschleiß feststellbar. Mit zunehmender Zyklenanzahl treten zunächst plastische Verformungen in Form von Materialermüdungen auf, die später als Materialabtrag sichtbar werden. Denkbar ist zusätzlich eine Kombination der vorgenannten Verschleißvorgänge.

Charakteristisch ist zudem, dass beim Parking Abrasion Test ein kreisrunder Verschleiß auftritt. Mittig findet zunächst ein verringerter Materialabtrag statt, da die Tangentialgeschwindigkeit in den äußeren Bereichen am höchsten ist (in der Mitte ist die Tangentialgeschwindigkeit nahezu null). Mit fortschreitendem Verschleiß wird auch das Beschichtungssystem in der Mitte abgetragen.

Die generelle Eignung des Verfahrens wurde bereits in Abschnitt 3.7 erörtert. Es zeigte sich bei den bereits durchgeführten Versuchen, dass die Verschleißbeständigkeit sowohl der einzelnen Systeme als auch innerhalb eines Systems sehr stark variieren kann ([Ladner et al. - 2014b], [Breit et al. - 2015a], [Ladner et al. - 2016]). Mit dem Parking Abrasion Test und einem normativen Verfahren wurden Vergleichsversuche durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es zu bewerten, ob es möglich ist, eine Korrelation zwischen dem Parking Abrasion Test und einem normativen Verfahren herzustellen. Oder sind die Verschleißmechanismen im praktischen Versuch gegensätzlich und ein Vergleich der Ergebnisse ist nicht möglich? Es wurden daher direkte Vergleichsversuche zwischen dem BCA- und dem PAT-Verfahren durchgeführt.

Als weitere Fragestellung gilt es den Einfluss der Reifen auf das Verschleißverhalten zu bestimmen. Die Reifenindustrie entwickelt die Reifen permanent weiter,

entsprechend unterschiedlich ist das Prüfmedium. Wie stark steuern Reifenart, -größe, -profil die Versuchsergebnisse? Es wurden daher vergleichende Versuche durchgeführt, bei denen die Oberflächentemperaturen aufgezeichnet wurden, sodass daraus Rückschlüsse gezogen werden konnten. Weitere Oberflächentemperaturen wurden vergleichend zwischen dem Bänziger Rad, dem Vorgängerprüfstand der Sika Deutschland GmbH, und dem PAT-Verfahren durchgeführt. Hintergrund dieser Versuche waren die z. T. variierenden Prüfbedingungen. Hier galt es zu klären, wie stark sich die Prüfergebnisse unterscheiden und ob dies als signifikant zu bewerten ist.

Oberflächenschutzsysteme sind in der Praxis Umwelteinflüssen, bestehend aus jahreszeitlichen und täglichen Temperaturdifferenzen und unterschiedlich hoher Feuchtigkeit, ausgesetzt. Diese sind abhängig von Belüftung, Abwärme der Nachbarbebauung, parkenden Autos, deren Frequentierung sowie den eingetragenen Verschmutzungen und den applizierten Schichtdicken. Dabei sind Bauteiloberflächentemperaturen von 60 bis 70 °C an frei bewitterten Parkbauten zu erwarten. Werden zusätzlich noch winterliche Temperaturen von -20 °C berücksichtigt, so müssen Beschichtungssysteme einen Temperaturbereich von circa 90 K (bzw. bis zu 60 K [Eßer u. Schöppel - 2004] in geschlossenen Parkbauten) überbrücken können und dabei weiterhin die Eigenschaften (wie z. B. Rissüberbrückungsfähigkeit), wie sie in [DAfStb - 2001], [DIN EN 1504-2] bzw. [DIN EN 18026] definiert sind, aufweisen.

Die Verschleißbeständigkeit ist auch von diesen Faktoren abhängig. Neben der Beanspruchungsart und -häufigkeit haben die mechanischen Kennwerte der verwendeten Kunststoffe einen Einfluss auf die Beständigkeit der Oberflächenschutzsysteme. Bei den produktspezifischen Untersuchungen wurden daher zunächst die Shore-Härte nach [DIN EN ISO 868] und Zugmodule / -festigkeiten nach [DIN ISO 527-2] bei unterschiedlichen Prüfbedingungen bestimmt. In kleinmaßstäblichen Versuchen konnten die Proben einer Wasserbeanspruchung bzw. unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt werden. Es wurden sowohl Untersuchungen an den Einzelkomponenten, z. T. mit und ohne Quarzsandabstreuerung, als auch am Gesamtsystem durchgeführt. Ziel dieser Versuche war es, die Eigenschaften der einzelnen Schichten besser bewerten zu können, sodass der Prüfungsaufwand mit dem anschließenden Parking Abrasion Test reduziert werden und eine Auswahl des Oberflächenschutzsystems erfolgen konnte. Mit dem Parking Abrasion Test wurde anschließend die Verschleißbeständigkeit jeweils an wasserbeaufschlagten Proben, an zusätzlich mit Splitt beanspruchten Proben sowie der Einfluss der Deckversiegelung auf das Verschleißverhalten ermittelt.

Offene Fragestellungen waren daher: Können produktspezifische Eigenschaften mit dem Parking Abrasion Test abgebildet werden? Welchen Einfluss haben Eigenschaften wie Shore-Härte und Zugmodul auf die Verschleißbeständigkeit? Wie verhalten sich die Materialeigenschaften, wenn die Oberflächenschutzsysteme mit Wasser beaufschlagt werden oder unterschiedliche Umgebungstemperaturen vorliegen? Ist der Einfluss der einzelnen Schichtdicken hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit abschätzbar? Werden die unterschiedlichen Materialkennwerte auch beim Parking Abrasion Test sichtbar? Wie stark ist der Einfluss von Verunreinigungen (Splitt) auf die Verschleißbeständigkeit? Wie ändern

sich die Haftzugfestigkeiten in belasteten Bereichen im Vergleich zu unbelasteten? Können diese Unterschiede mit dem Parking Abrasion Test dargestellt werden?

## **6.2 Korrelation BCA- / PAT-Verfahren**

### **6.2.1 Allgemeines**

Die in Parkbauten applizierten Oberflächenschutzsysteme sind nach den aktuell gültigen Normen geprüft und zugelassen. Dies erfolgt auf der Basis der Verschleiß- bzw. Abriebsprüfung u. a. nach dem BCA-Verfahren. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bewerten zu können, ist es unabdingbar das BCA-Verfahren mit dem PAT-Verfahren vergleichend zu prüfen, um ggf. eine Korrelation zwischen beiden Verschleißverfahren herstellen zu können.

Hierfür wurden an insgesamt sieben verschiedenen Probekörpern (Tab. 6.1) Verschleißversuche an unterschiedlichen Oberflächenschutzsystemen mit beiden vorgenannten Verfahren durchgeführt.

Tab. 6.1: Probekörper für den Vergleich BCA- / PAT-Verfahren

Probekörper	Oberflächenschutzsystem	Bemerkung
P1	OS 11a	BCA + PAT
P2	OS 11b	BCA + PAT
P3	OS 11b	BCA + PAT
P4	OS 11b	BCA + PAT
P5	OS 11b	BCA (bis 142.500 Zyklen) + PAT
P6	OS 8	BCA + PAT
P7	OS 13	BCA + PAT

Beim BCA-Verfahren beträgt die Prüfdauer 2.850 Umdrehungen. Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die Systeme bei beiden Prüfverfahren mit 15.000 Umdrehungen / Zyklen beansprucht. Ein Probekörper wurde zusätzlich mit 142.500 Zyklen geprüft, da untersucht werden sollte, ob ein weniger verschleißbeständiges System bei einer häufigeren Anzahl an Überfahrungen mit dem BCA-Verfahren zu einem stärkeren Verschleißverhalten neigt. Ebenfalls wurden zwischen den Intervallen von 1.000 bzw. 2.500 Zyklen beim BCA-Verfahren entsprechende Pausen eingehalten, um eine zu starke Erwärmung der Oberfläche beim Überfahren zu vermeiden. Die gemessene Oberflächentemperatur betrug dabei max. 45 °C. Beim BCA-Verfahren entspricht eine Umdrehung bzw. ein Zyklus aufgrund der drei Stahlräder drei Überfahrungen.

### **6.2.2 Ergebnisse**

In Tab. 6.2 sowie Abb. 6.1 und Abb. 6.2 sind die vergleichenden Untersuchungsergebnisse zwischen PAT- und BCA-Verfahren dargestellt. Offensichtlich führten nur die Untersuchungen mit dem PAT-Verfahren zu Verschleißerscheinungen am Oberflächenschutzsystem, da die Systeme verschiedenen Verschleißkategorien zugeordnet werden können. Mit dem BCA-Verfahren konnte lediglich am OS 13-System (Probekörper P7, VK 3) ein

nennenswerter Verschleiß dokumentiert werden, sodass alle anderen Systeme in VK 1 einzustufen waren. Der Verschleiß von P1, P2 und P7 fand beim PAT-Verfahren in der hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschicht statt.

Tab. 6.2: Verschleißkategorien der geprüften OS-Systeme nach 15.000 Zyklen geprüft mit PAT- und BCA-Verfahren

Probekörper	Verschleißkategorie	
	PAT	BCA
P1 (OS 11a)	VK 5	VK 1
P2 (OS 11b)	VK 4	VK 1
P3 (OS 11b)	VK 1	VK 1
P4 (OS 11b)	VK 1	VK 1
P5 (OS 11b)	VK 2	VK 1
P6 (OS 8)	VK 2	VK 1
P7 (OS 13)	VK 4	VK 3

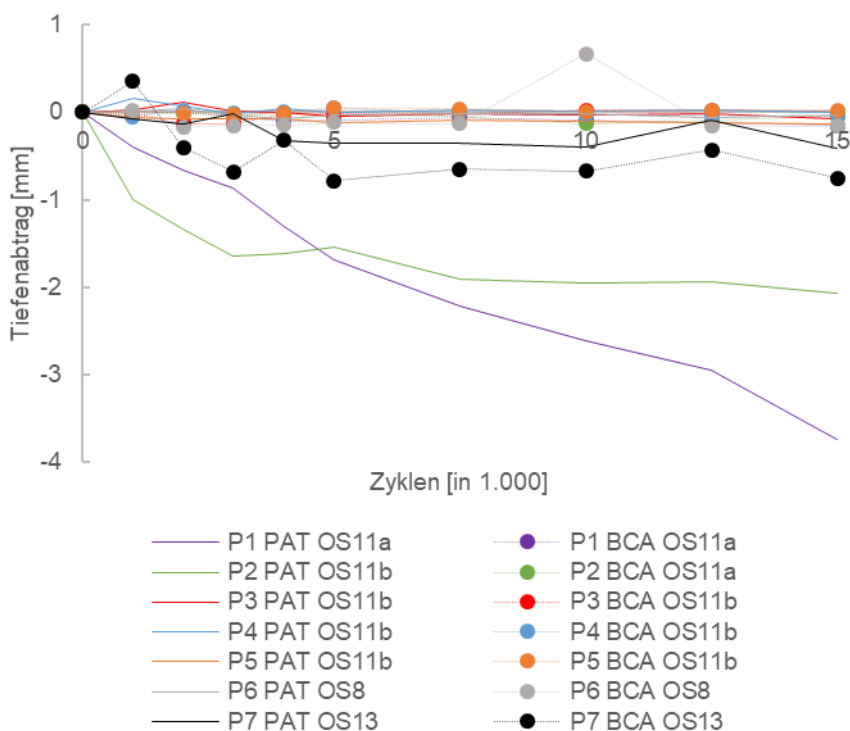


Abb. 6.1: Maximaler Tiefenabtrag der geprüften OS-Systeme im Vergleich der PAT- / BCA-Prüfungen

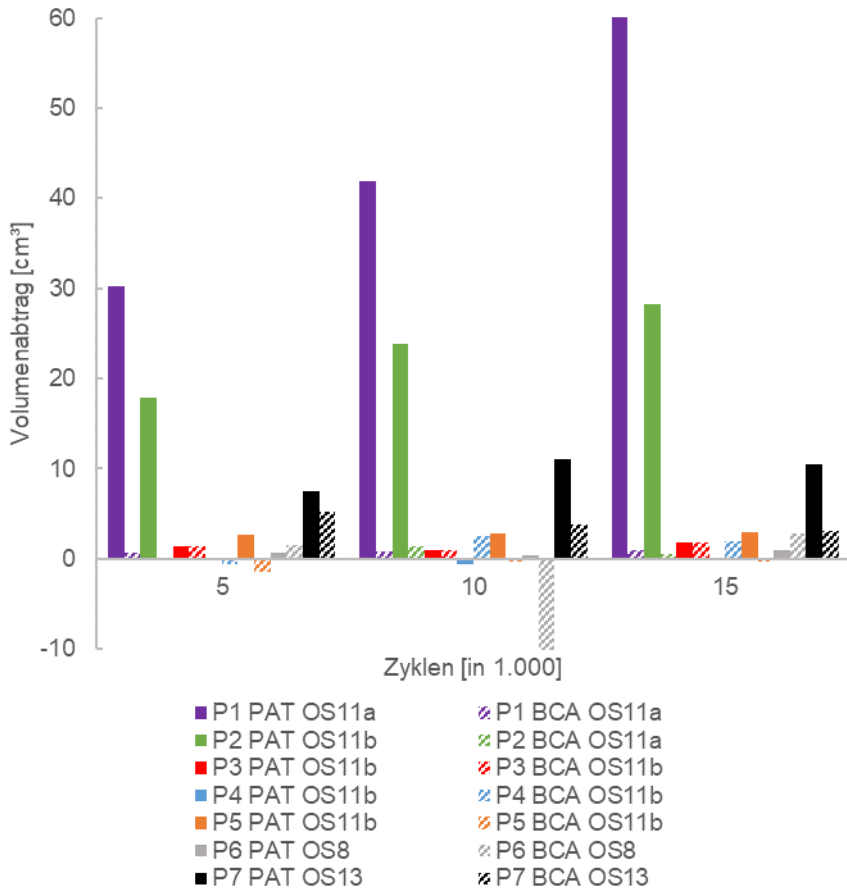


Abb. 6.2: Volumenabtrag im Vergleich der PAT- / BCA-Prüfungen

Von den hier geprüften Systemen ist das System P5 als OS 11b-System eines der elastischeren Systeme. Dieses System wurde, bezogen auf die Robustheit hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit, im Mittelfeld der geprüften OS 11b-Systeme mit dem PAT-Verfahren eingestuft. An diesem System wurde daher getestet, ob und ggfs. ab wann Verschleiß an der Oberfläche mit dem BCA-Verfahren auftritt. Selbst nach dem Erreichen von 142.500 Zyklen (entspricht der 50-fachen Anzahl an Überfahrungen die normativ mit dem BCA-Verfahren vorgegeben ist) konnten lediglich abgefahrene Kornspitzen an der Oberfläche dokumentiert werden.

### 6.2.3 Schlussfolgerung

Im Bauwesen gilt die allgemein gültige Konstruktionsregel („Weich auf Hart“) des positiven Gradienten der Scherfestigkeit. Dies bedeutet, dass die obere Schicht eine geringere Festigkeit aufweisen soll als die darunterliegende Schicht. Beim OS 11a-System besteht die hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschicht aus zwei Schichten: der ca. 1,5 mm dicken, weichen, elastischen Schwimmschicht und der

darüber liegenden ca. 3,0 mm dicken, deutlich steiferen Verschleißschicht. Dieser Aufbau verhält sich entgegen der allgemein gültigen Konstruktionsregel. Ziel dieses Systemaufbaus ist die Entkopplung der weicheren (elastischen) Schicht vom Untergrund, sodass bei Verformungen des Untergrunds diese nicht bis an die vergleichsweise starre Oberschicht übertragen werden können. Der Verschleißmechanismus Adhäsion war bei diesem elastischen System stark ausgeprägt. Beim BCA-Verfahren wirken aufgrund der permanenten Rollbewegung hauptsächlich Normalspannungen und keine Scherspannungen. Innere Reibungsprozesse treten nur in sehr geringem Maß auf und können vernachlässigt werden. Trotz der Nichteinhaltung des positiven Gradienten kommt es aufgrund der fehlenden bzw. sehr niedrigen Scherspannungen zu keinem messbaren Verschleiß. Lediglich die Kornspitzen werden aufgrund der stattfindenden Oberflächenzerrüttung abgefahren.

Bei den OS 11b-Systemen besteht die hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschicht aus einer ca. 4,0 mm dicken Schicht, die Schwimm- und Verschleißschicht in sich vereinigt. Beim BCA-Verfahren beschränkte sich der Verschleiß nur auf abgefahrte Kornspitzen bzw. geringen Abtrag der Deckversiegelung, während beim Parking Abrasion Test der Verschleiß z. T. auch in der darunterliegenden Verschleißschicht stattfand. Die Adhäsion des Reifens auf der Oberfläche des elastischen Systems begünstigte dies wie auch schon beim vorgenannten OS 11a-System.

Das OS 13-System ist ein relativ starres System, das dauerhaft nur eine statische, aber keine dynamische Rissüberbrückung ermöglicht. Die hier geprüften OS 13-Systeme wurden nicht mit Quarzsand, sondern wie vom Produkthersteller vorgesehen mit Splitt abgestreut. Das gewählte Größtkorn war mit 0,3 bis 0,7 mm größer und die Oberfläche dadurch deutlich rauer als die mit Quarzsand abgestreuten Systeme. Die beim BCA-Verfahren verwendeten sehr harten Stahlrollen führten dazu, dass die Einstreuung zermahlen wurde. Das Füllmaterial konnte, aufgrund seiner spröden Materialeigenschaften, die lokalen Spannungsspitzen nicht ableiten und wurde daher zu kleineren Gesteinskörnern und Staubpartikeln zerrieben. Dies war auf der Oberfläche deutlich erkennbar. Der relative Verschleiß nahm mit zunehmender Zyklanzahl ab, da die Kornspitzen abgefahren waren und die Oberfläche nicht mehr die ursprüngliche Rauigkeit aufwies. Hierdurch vergrößerte sich die Auflagefläche für die Stahlrollen und das Füllmaterial konnte die auftretenden Spannungen in den Untergrund ableiten. Mit Beendigung des sogenannten Einlaufverschleißes nahm die Verschleißtiefe nicht mehr weiter zu.

Die Konstruktionsregel des positiven Gradienten war bei den OS 8-Systemen eingehalten. Als Abstreuerung wurde hier wieder Quarzsand verwendet. Dies führte dazu, dass sowohl mit dem BCA- als auch PAT-Verfahren kein Verschleiß registriert werden konnte.

Eine Korrelation zwischen dem BCA- und PAT-Prüfverfahren konnte nicht festgestellt werden, da die verursachten Beanspruchungen beider Prüfverfahren auf die Systeme sehr verschieden sind. Die unterschiedlichen Verschleißmechanismen Adhäsion (PAT-Verfahren) und Oberflächenzerrüttung (BCA-Verfahren) zeigten sich in den Versuchen deutlich. So kam es z. B. mit dem PAT-Verfahren bei dem OS 11a-System



zu einem erkennbaren Verschleiß, wohingegen mit dem BCA-Verfahren kein Abrieb feststellbar war. Beim OS 13-System wurde dagegen mit dem BCA-Verfahren ein stärkerer Verschleiß dokumentiert, welcher auf die verwendete Abstreuerung zurückzuführen ist. Das OS 8-System verhielt sich erwartungsgemäß bei beiden Beanspruchungen sehr robust und es konnte kein Verschleiß aufgezeichnet werden. Auch die OS 11b-Systeme erwiesen sich in beiden Prüfmethoden als sehr robust. Hier trat bei beiden Testmethoden nur geringer Verschleiß auf. Eine bessere Korrelation kann aufgrund der ebenfalls drehend-rollenden Beanspruchung ggf. mit dem Driving Abrasion Test erzielt werden. Dies wurde jedoch nicht überprüft.

Ähnliche Ergebnisse sind bei Prüfungen mit dem RWA-Verfahren zu erwarten, da auch bei diesem Verfahren der maßgebende Verschleißmechanismus die Oberflächenzerrüttung ist. Bei vergleichenden Versuchen mit dem Taber-Verfahren zeigte sich in einem kleinen Ringversuch, dass bereits nach kurzer Zeit ein Verschleiß der Systeme stattfand. Dieser war zum einen jedoch nicht reproduzierbar und zum anderen spiegelte dieser auch nicht das Schadensbild im Parkbau wider, da ähnlich zum BCA-Verfahren ein „Abmahlen“ der Beschichtung stattfand und nicht einzelne Körner bzw. Korngruppen ausbrachen [Pusel - 2020]. Adhäsion oder Abrasion finden bei der Stuttgarter Prüfung statt, jedoch betragen die resultierenden Normal- und Querkräfte nur 10 % der Beanspruchungen mit dem PAT-Verfahren bzw. der Belastung im Parkbau. Daher ist auch bei diesem Verfahren mit keinem Verschleiß zu rechnen. Für die Prüfpraxis bedeuten diese Ergebnisse, dass ein Verschleißverhalten nicht mit den normativen Verfahren nachweisbar ist. Weiterhin bedeutet dies zusätzlich, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass mit Erreichen einer bestimmten Grenzbeanspruchung (Prüfung mit den normativen Prüfverfahren) eine ausreichende Beständigkeit vorliegt, auch wenn die Beanspruchung anders ist. Mit dem PAT-Verfahren lässt sich der Verschleiß aus dem Parkbau abbilden und auch der erwartungsgemäß stärkere Verschleiß an den elastischen Systemen kann dargestellt werden.

## **6.3 Abgleich PAT-Verfahren / Bänziger Rad**

### **6.3.1 Allgemeines**

Der Parking Abrasion Test ist eine Weiterentwicklung des Bänziger Rades. An beiden Versuchsständen werden Verschleißprüfungen an Oberflächenschutzsystemen durchgeführt, wobei es sich bei den Versuchen mit dem Bänziger Rad im Wesentlichen um firmeninterne Produkttests bei der Sika Deutschland GmbH handelt. In einer gemeinsamen Veröffentlichung mit der Technischen Universität Kaiserslautern [Ladner et al. - 2018] wurden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Prüfstände hervorgehoben (Tab. 6.3). Hierdurch soll die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse gewährleistet werden.

Tab. 6.3: Überblick der Prüfstände der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK – Parking Abrasion Test) und der Sika Deutschland GmbH (Bänziger Rad) aus [Ladner et al. - 2018]

Prüfparameter	Parking Abrasion Test	Bänziger Rad
Belastungsparameter		
Auflast	450 kg	400 kg
Reifendruck	2,3 bar	2,5 bar
Reifengröße	195/65 R 15 91H	175/65 R 14
Versuchstechnisch		
Antriebsmotor	elektronisch	pneumatisch
Drehbewegung	90°	80°
Zeit je Drehbewegung	4 Sek.	2,5 Sek.
Pause zwischen 1. + 2. Zyklus	7 Sek.	Keine Pause, sofortige Rückdrehung
Pause zwischen 2. + 3. Zyklus	7 Sek.	5 Sek.
Zyklusablauf (Dauer Drehung – Pause)	4-7-4-7..	2,5-0-2,5-5-2,5-0-2,5-5..
Zyklusanzahl	15.000	30.000
Versuchspraktisch		
Dokumentation	0 bis 5.000 Zyklen alle 1.000 Zyklen 5.001-15.000 Zyklen alle 2.500 Zyklen	Zunächst 2.000 Zyklen an einer Messstelle, dann mit Abfrage von Versuchsschema (Abb. 3.15) weitere Prüfungen an den anderen Messstellen
Dokumentarisch / Bewertung		
Dokumentation	Visuell / Foto, Schichtdickenmessung, 2D / 3D-Laser	Visuell / Foto
Bewertung	6 Verschleißklassen	5 Verschleißklassen

Auflast und Reifendruck sind vergleichbar, die Reifengröße ist jedoch verschieden. Dies führt folglich zu unterschiedlichen Radaufstandsflächen, die die wirkenden Kräfte in den Boden ableiten, und auch zu abweichenden Oberflächentemperaturen. Das Bänziger Rad wird pneumatisch und der Parking Abrasion Test elektrisch betrieben. Die Drehwinkel unterscheiden sich nur geringfügig um 10°.

Die Versuchsdurchführung unterscheidet sich dagegen deutlich. Die Zykluslänge beträgt beim Parking Abrasion Test elf Sekunden, vier Sekunden für die Drehung um 90° und sieben Sekunden Pause. Der erste und zweite Zyklus müssen beim Bänziger Rad zusammen betrachtet werden, da nach dem ersten Zyklus nicht pausiert wird. Erst nach der Rückdrehung erfolgt eine fünfsekündige Pause. Die maximale Zyklusanzahl ist ebenfalls verschieden, da beim Parking Abrasion Test eine Rotation als ein Zyklus betrachtet wird. Beim Bänziger Rad zählt als ein Zyklus dagegen die Hin- und

Rückrotation. Dementsprechend beträgt die maximale Zyklusanzahl 15.000 bzw. 30.000.

Eine weitere Variation tritt bei der Durchführung auf: Beim Parking Abrasion Test erfolgt die Prüfung an einer Prüfstelle, beim Bänziger Rad an vier Prüfstellen. Mit Erreichen einer im Vorfeld definierten Zyklusanzahl wird das Beschichtungssystem bewertet und die Zyklusanzahl für die nächste Prüfstelle festgelegt (siehe Abb. 3.15 in Abschnitt 3.6.5).

## **6.3.2 Ergebnisse**

### **6.3.2.1 Temperaturversuche an einer Stahlplatte**

Um die Vergleichbarkeit der beiden Prüfstände besser beurteilen zu können, wurden Temperaturmessungen durchgeführt. Die Versuche erfolgten jedoch nicht an einem beschichteten Probekörper, sondern an einer Stahlplatte mit den jeweiligen Prüfparametern aus Tab. 6.3. Hierfür wurden die jeweiligen Räder, Auflasten und Zyklusabläufe (belastungs- und versuchstechnische Parameter mit Ausnahme des Antriebsmotors) beim Prüfstand Parking Abrasion Test berücksichtigt bzw. programmiert. Die Temperaturfühler wurden an der Unterseite der Stahlplatte angebracht. Die Daten wurden im Minutentakt bis zum Erreichen einer Temperaturkonstanz (nach circa acht Stunden) aufgezeichnet. Folgende Messreihen wurden durchgeführt:

- Bänziger Prüfrad (Sika Rad) und Bänziger Prüfparameter (Sika Parameter)
- Bänziger Prüfrad (Sika Rad) und Parking Abrasion Test Prüfparameter (TUK Parameter)
- Parking Abrasion Test Prüfrad (TUK Rad) und Parking Abrasion Test Prüfparameter (TUK Parameter)
- Parking Abrasion Test Prüfrad (TUK Rad) und Bänziger Prüfparameter (Sika Parameter)

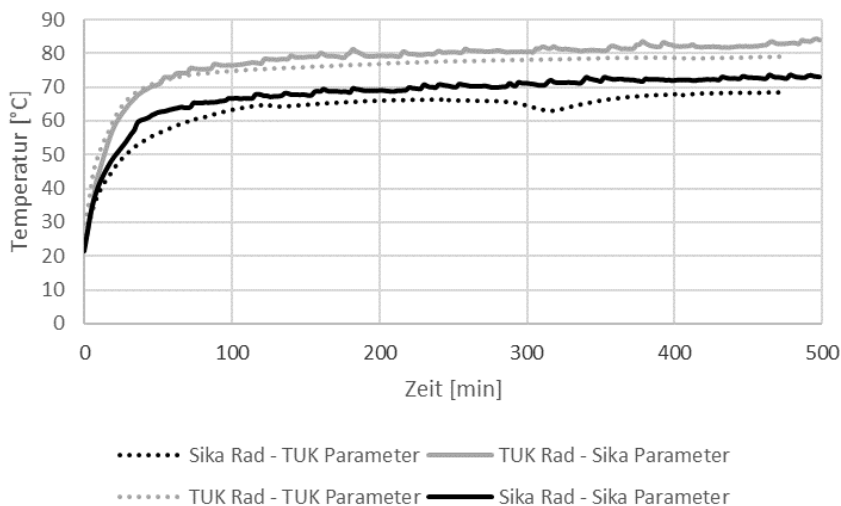


Abb. 6.3: Zeitliche Temperaturentwicklung beim Parking Abrasion Test und Bänziger Rad in Abhängigkeit von Reifengröße und Prüfparametern an einer Stahlplatte

Die Temperaturen auf einer Stahloberfläche sind bis zu ca. 15 K höher (siehe Ergebnisse in 6.4) als auf einer beschichteten Oberfläche. Die größere Radaufstandsfläche führt erwartungsgemäß zu höheren Bauteiltemperaturen (in diesem Falle 10 K). Die Pausen zwischen jeder Drehbewegung beim Parking Abrasion Test führen zu um bis zu 3 K niedrigeren Prüftemperaturen.

### 6.3.2.2 Verschleißbeständigkeit am Oberflächenschutzsystem

Zusätzlich zu den Temperaturversuchen wurden Vergleichsversuche mit dem Parking Abrasion Test und dem Bänziger Rad an drei beschichteten Betonplatten durchgeführt. Die Platten waren mit einem OS 8, OS 11b und OS 11a-System beschichtet. Geprüft wurde an zwei gegenüberliegenden Prüfstellen auf einem Prüfkörper über insgesamt 15.000 Zyklen (Zählweise Parkin Abrasion Test). An einer Prüfstelle erfolgte die Prüfung mit dem Prüfrad und den Prüfparametern der Technischen Universität, an der anderen mit denen der Sika Deutschland GmbH und deren Prüfrad. An keiner Prüfstelle, gleich welches Mess- oder Oberflächenschutzsystem, konnten nach 15.000 Zyklen Verschleißbeanspruchungen nachgewiesen werden. Lediglich die Kornspitzen waren minimal abgefahren. Dies zeigt, dass die unterschiedlichen Prüfparameter der beiden Prüfstände keinen nennenswerten Einfluss auf Verschleißbeständigkeit der Oberflächenschutzsysteme haben und die Verschleißbeständigkeit von den jeweiligen Produkt- bzw. Materialeigenschaften abhängig ist.

### 6.3.3 Schlussfolgerung

Bei den Temperaturversuchen an der Stahlplatte konnten sehr deutlich Unterschiede hinsichtlich der Temperaturbelastung in Abhängigkeit von den Prüfparametern und der

Reifengröße dokumentiert werden. Die Versuchsparameter des breiteren Rades der Technischen Universität Kaiserslautern führen generell zu höheren Temperaturen als die Prüfparameter des Bänziger Rades mit nur einer Pause zwischen den Rotationen. Zwischen härtester und niedrigster Beanspruchung liegt eine Temperaturdifferenz von ca. 15 K.

Bei den anschließenden Versuchen an den drei Oberflächenschutzsystemen zeigte sich jedoch, dass, obwohl der Reifenabrieb variierte, kein Unterschied im Verschleiß an den Beschichtungen festgestellt werden konnte. Bis auf Weiteres lässt dies den Rückschluss zu, dass die Ergebnisse zwischen beiden Prüfapparaturen vergleichbare Ergebnisse liefern. Sowohl die unterschiedliche Reifengröße als auch die zusätzliche Pause können vernachlässigt werden. Diese Befunde korrelieren auch sehr gut mit den Ergebnissen aus dem folgenden Abschnitt bzgl. der Temperaturentwicklung bei unterschiedlichen Reifengeometrien (Abschnitt 6.4). Eine Wiederholung der Tests mit weniger verschleißrobusten Systemen ist zum Aufbau einer breiteren Datenbasis zu empfehlen.

## **6.4 Einfluss unterschiedlicher Reifengeometrien auf die Temperaturentwicklung (und das Verschleißverhalten)**

### **6.4.1 Allgemeines**

Die Verschleißstärke ist neben dem zu prüfenden Oberflächenschutzsystem, den Prüfparametern wie Auflast, Zyklenzahl und Pausen zwischen den einzelnen Zyklen u. U., wie in der tribologischen Betrachtung bereits erörtert, auch vom Gegenkörper, dem Prüfrad, abhängig. Der Einfluss der Reifengröße auf die Temperaturentwicklung an einem Beschichtungssystem wurde daher vergleichend untersucht. Dabei wurden die in Tab. 6.4 genannten Reifen miteinander verglichen. Die Reifengröße 195/65 R15 ist am häufigsten vertreten, da diese zu der meistverkauften Reifengröße zählt und die weiteren Verschleißversuche damit durchgeführt wurden. Die Größenkennzeichnung des PKW-Reifens erfolgt nach folgendem Beispiel:

*195/65 R15 (W)* (6.1)

mit:	195	Reifenbreite in mm
	65	Höhen-Breitenverhältnis in %
	R	Bauart (Radial)
	15	Felgen- oder Reifeninnenmaß in Zoll
	(W)	ggf. weitere Angabe für Reifen, ohne weitere Angabe: Sommerreifen; W für Winter, M+S für Allwetter

Tab. 6.4: Untersuchte Reifengrößen hinsichtlich des Einflusses auf die Temperaturentwicklung während der PAT-Prüfung

Nr.	Größe	Art
1	165/65 R15	Sommerreifen
2	165/65 R15 (W)	Winterreifen
3	175/55 R15	Sommerreifen
4	175/60 R15 (W)	Winterreifen
5	195/65 R15	Sommerreifen
6	195/65 R15	Sommerreifen
7	195/65 R15	Sommerreifen
8	195/65 R15 (W)	Winterreifen
9	195/65 R15 M+S	Allwetterreifen
10	205/50 R15	Sommerreifen
11	205/50 R15 (W)	Winterreifen
12	215/60 R15	Sommerreifen
13	215/60 R15 (W)	Winterreifen

Für die Dokumentation der Temperaturen wurde ein testo Datenlogger verwendet. Die Messung der Temperatur erfolgte mit 3 Thermo-Temperaturfühlern Typ K, die mit einem Zweikomponenten-Wärmeleitkleber mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1 W/mK fixiert wurden. Gemessen wurde die Temperatur zunächst auf einer Stahlplatte, da dies prüftechnisch einfacher war und nur ein Verschleiß an den Reifen entstand. Die Prüfungen an der Stahlplatte wurden zweifach auf derselben Prüfplatte (Stahl 1 und Stahl 2 in Tab. 6.5) zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt. Dokumentiert wurde die Temperatur an drei Stellen, die in Abb. 6.4 ersichtlich sind. Die Temperatursensoren wurden dafür unterseitig an der Stahlplatte befestigt (Abb. 6.5).

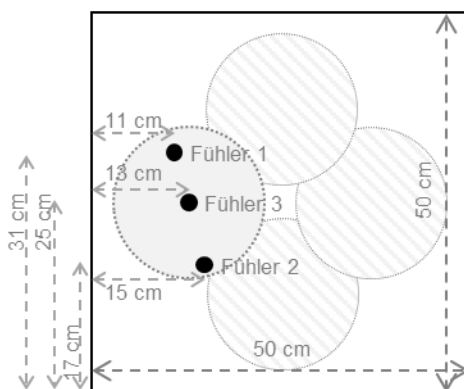


Abb. 6.4: Darstellung der Anordnung der Messfühler 1 bis 3 für die Bestimmung der Temperaturentwicklung mit dem Parking Abrasion Test

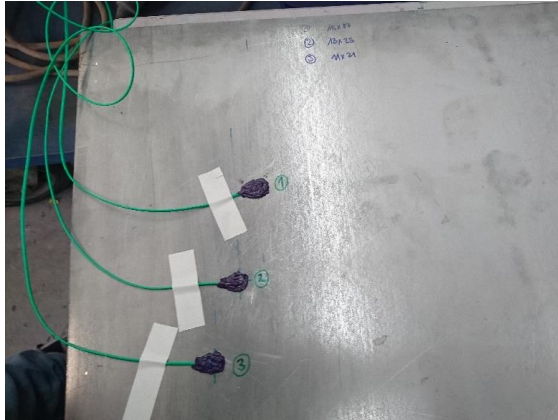


Abb. 6.5: Fühler 1 bis 3 auf der Unterseite der Stahlplatte zur Dokumentation der Temperaturentwicklung

Die Prüftemperatur lag bei allen Prüfungen bei Raumtemperatur (ca. 25 °C). Nach jeweils zehn Minuten wurde die Temperatur gemessen und nach Erreichen einer konstanten Oberflächentemperatur wurde die Messung beendet.

Im Anschluss wurden die verschiedenen Reifen zusätzlich auf einem OS 11a-System getestet. Die Sensoren wurden dafür vor dem Beschichten an den gleichen Messstellen auf der sandgestrahlten Betonoberfläche befestigt. Von jedem Reifen wurde zusätzlich die Reifenaufstandsfläche ermittelt. Hierfür wurde von jedem Reifen die Lauffläche mit herkömmlicher Wandfarbe eingefärbt und anschließend das Profil auf ein DIN A4-Papier gestempelt (beispielhaft in Abb. 6.6 und Anhang D). Die Auflast betrug dabei analog zum Parking Abrasion Test 450 kg und es lag ein Reifeninnendruck von 2,5 bar vor. Vermessen wurde die Radaufstandsfläche mit dem Bildverarbeitungsprogramm GIMP (siehe Tab. 6.5). Hierbei wurde die Differenz von den farbigen zu den weißen Pixeln auf einer DIN A4-Seite bestimmt und darüber die Radaufstandsfläche ermittelt.

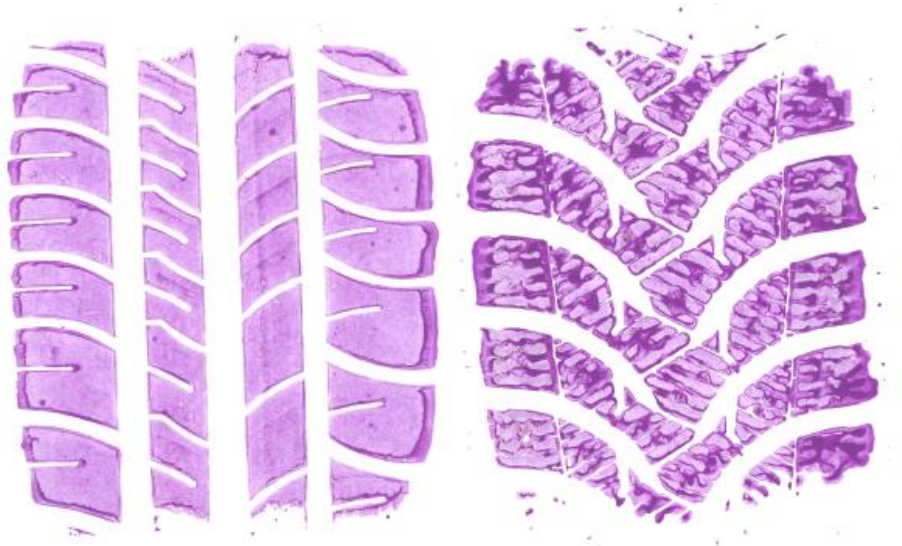


Abb. 6.6: Vergleich der unterschiedlichen Aufstandsflächen und Profile von Sommerreifen (links, Nr. 1) und Winterreifen (rechts, Nr.2) am Beispiel der Größe 165/65 R15

#### 6.4.2 Ergebnisse

In den Diagrammen in Abb. 6.7 und Abb. 6.8 sind die Temperaturentwicklungen gemessen von Fühler 3 (Feldmitte) auf der Stahlplatte und dem Beschichtungssystem dargestellt. Die Darstellungsart der Temperaturverläufe gemessen an den Reifen unterscheidet sich darin, dass Reifen der gleichen Art (Sommer- oder Winterreifen) in der gleichen Farbe dargestellt sind und zusätzlich durch eine gestrichelte Linie oder einem Markierungspunkt innerhalb der Art unterscheiden. Die Sommerreifen mit der Reifengröße 195/65 R 15 (rote Linie) spiegeln die Reifengröße wider, mit der die weiteren Versuche im Parking Abrasion Test durchgeführt wurden.



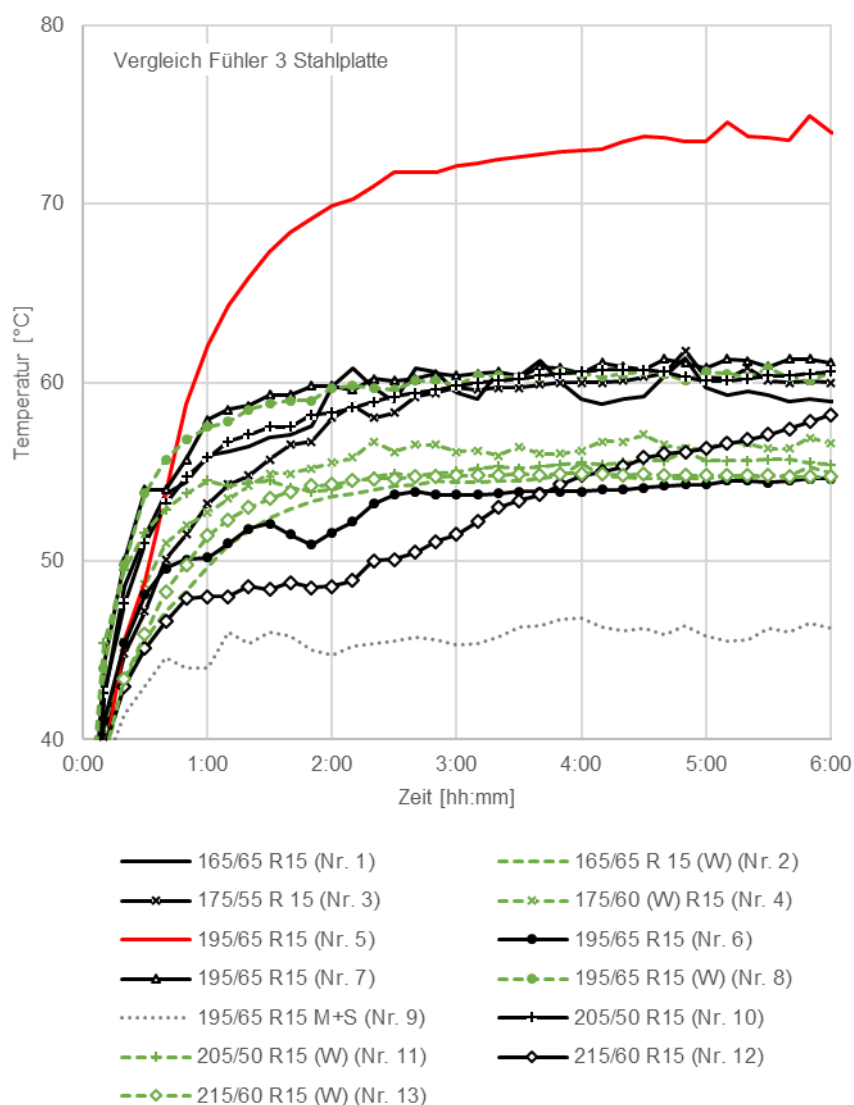


Abb. 6.7: Gegenüberstellung der zeitlichen Temperaturentwicklung auf einer Stahlplatte gemessen mit Fühler 3 (Feldmitte) in Abhängigkeit von der Reifengröße und Unterscheidung in Sommerreifen (schwarze Linien) und Winterreifen (grüne Linien)

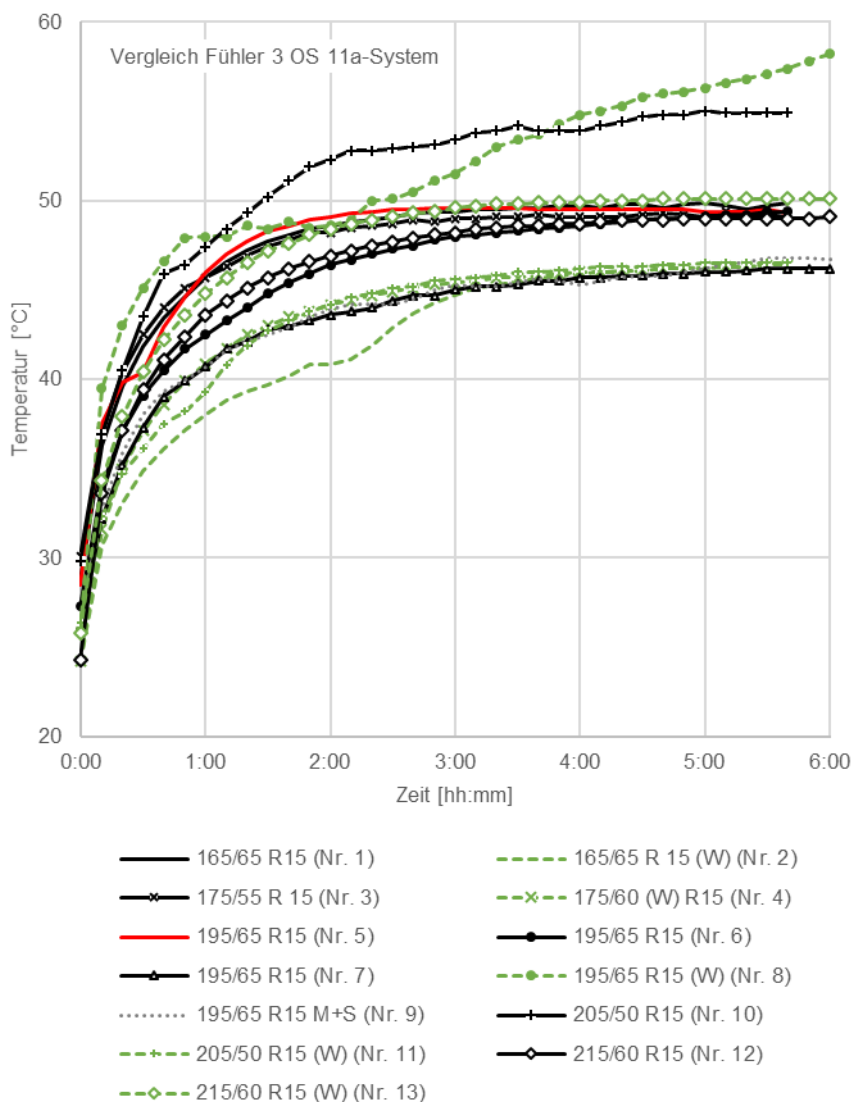


Abb. 6.8: Gegenüberstellung der zeitlichen Temperaturentwicklung auf einem OS 11a-System gemessen mit Fühler 3 (Feldmitte) in Abhängigkeit von der Reifengröße und Unterscheidung in Sommerreifen (schwarze Linien) und Winterreifen (grüne Linien)

Eine generelle Aussage über die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Reifengröße konnte nicht getroffen werden. Mit steigender Auflagefläche wurde erwartet, dass die Oberflächentemperatur zunimmt. Eine Korrelation zwischen Aufstandsfläche und Reifentemperatur konnte jedoch nicht ermittelt werden. Die Gummimischung hat demnach einen zu großen Einfluss auf die Reifentemperatur und damit die Oberflächenerwärmung. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass größere Reifen

nicht zwangsläufig zu größeren Radaufstandsflächen führten. In Tab. 6.5 sind die Maximaltemperaturen von Fühler 3 in Reifenmitte gelistet. Nach circa fünf Stunden sind die Maximaltemperaturen erreicht, ein weiterer Temperaturanstieg erfolgt nicht. Auf der Stahlplatte als auch beim Beschichtungssystem wurden im Rotationspunkt (Fühler 3) immer die höchsten Temperaturen erzielt. Generell waren die gemessenen Temperaturen auf der Stahloberfläche um bis zu 15 °C höher als auf dem Beschichtungssystem. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf der Stahlplatte war gegeben. Positiv zu bewerten ist, dass nur zwei der geprüften 13 Reifen auf dem Beschichtungssystem die Oberflächentemperatur von 50 °C minimal überstiegen (Abb. 6.8 und Tab. 6.5).

Tab. 6.5: Maximaltemperaturen bei den geprüften Reifen (Fühler 3) sowie zugehörige Aufstandsfläche

Nr.	Maximaltemperatur [°C]			Radaufstandsfläche [cm²]
	Stahl 1	Stahl 2	Beschichtet	
1	61,1	63,4	49,9	107,9
2	56,4	53,2	46,4	118,4
3	61,6	61,8	49,4	127,8
4	57,1	55,5	46,4	114,6
5	76,9	73,4	49,6	160,9
6	61,6	61,3	49,2	125,7
7	61,9	60,8	50,1	130,2
8	55,6	55,3	49,4	112,6
9	47,5	47,3	46,8	124,9
10	60,8	61,7	41,9	133,9
11	53,8	55,3	46,6	122,9
12	56,7	59,6	58,2	144,3
13	56,2	54,9	46,3	112,8

Die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Messfühlern waren unterschiedlich stark ausgeprägt. Dies ist auf das Reifenprofil bzw. die Reifenmischung zurückzuführen. Die Reifenprofile sind entsprechend den Bedürfnissen im Sommer und Winter unterschiedlich. Sommerreifen verfügen über grobe Einschnitte, die nach hinten verlaufen, sodass das Regenwasser abgeleitet werden kann. Winterreifen dagegen besitzen horizontale Lamellen, sodass sich die Reifen mit Eis und Schnee im Winter gut verzahnen können und die Gefahr des seitlichen Ausbrechens des PKWs reduziert wird. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Winterreifen aufgrund des Lamellen-Profiles eine geringere Aufstandsfläche (Reibungsfläche) aufweisen, die in Kombination mit den weicheren Reifenmischungen zu niedrigeren Temperaturen auf der Oberfläche führen. Diese Temperaturunterschiede zwischen Sommer- und Winterreifen konnten sowohl direkt auf der Stahlplatte als auch auf dem OS 11a-System (Abb. 6.7 und Abb. 6.8) ermittelt werden. Zusätzlich entstand ein größerer Reifenabrieb bei den Winterreifen.

Diese Ergebnisse stimmen mit denen im Forschungsvorhaben „Nachweis der Verschleißbeständigkeit von Parkhausbeschichtungssystemen unter realitätsnahen

Prüfbedingungen“ [Breit et al. - 2015a] beschrieben und in Abb. 6.9 dargestellten Ergebnissen überein. Die Auflast bei den vorausgegangenen Versuchen an einem OS 11a-System war um 50 kg niedriger und es wurde der Einfluss der Pausen gegenüber einer kontinuierlichen Rotation untersucht. Dies ergab eine Differenz von bis zu 20 K. Überdies wurden die Temperaturen in den einzelnen Schichten des Oberflächenschutzsystems aufgezeichnet. Die Differenz zwischen Verschleißschicht und Beton betrug bis zu 10 K bei einer kontinuierlichen Rotation und 5 K bei einer Pause von sieben Sekunden. Diese Betrachtung wurde in den vorgenannten Untersuchungen nicht berücksichtigt.

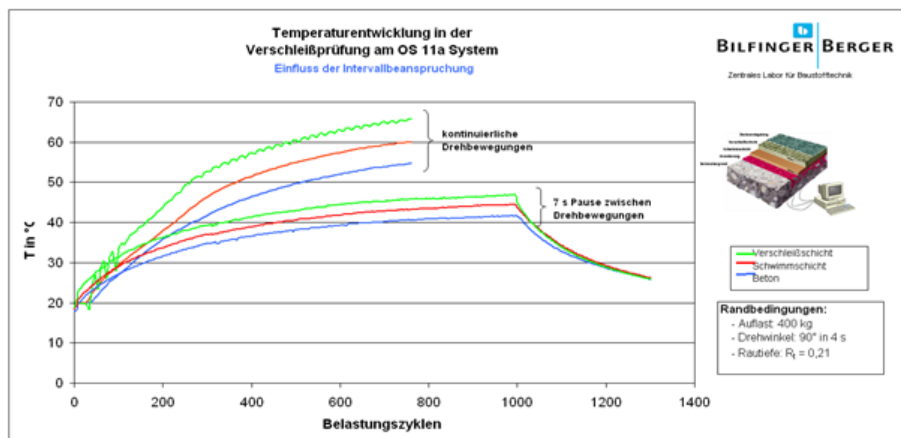


Abb. 6.9: Einfluss der Intervalldauer hinsichtlich der Temperaturentwicklung während der Verschleißprüfung mit dem Parking Abrasion Test bei einer Auflast von 400 kg [Breit et al. - 2015a]

### 6.4.3 Schlussfolgerung

Weniger die Reifengröße, sondern vielmehr die Reifenmischung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Temperaturentwicklung. Da die Reifenmischungen und -profile permanent weiterentwickelt werden und die Reifenindustrie jährlich neue Modelle produziert, ist es nicht möglich einen Musterreifen festzulegen. Reifen Nr. 5 ist ein Sommerreifen mit der Größe 195/65 R15, der in den nachfolgenden Verschleißuntersuchungen verwendet wurde. Hierbei handelt es sich um eine am häufigsten genutzten Reifengröße. Zusätzlich wies dieser neben der größten Radaufstandsfläche auch die höchsten Temperaturen auf der Stahlplatte auf, während auf dem Oberflächenschutzsystem die gemessenen Temperaturen im Mittelfeld lagen. Die ermittelten Temperaturen am Oberflächenschutzsystem der Sommerreifen mit der Größe 195/65 R 15 lagen alle zwischen 49,2 und 51,2 °C. Der Einfluss der Verschleißbeständigkeit in Abhängigkeit der verschiedenen Reifen wurde aufgrund des hohen Prüfungsumfangs nicht untersucht. Dies kann in weiteren Untersuchungen ein Schwerpunkt sein. Es kann jedoch bei Berücksichtigung des tribologischen Systems davon ausgegangen werden, dass der Gegenkörper, sofern es sich um einen Sommerreifen vorgenannter Größe und konstantem Reifendruck handelt, eine untergeordnete Rolle bzgl. der Verschleißentwicklung spielt wie die vergleichenden Untersuchungen in Abschnitt 6.3 gezeigt haben. Das Reifenprofil wird daher keinen

signifikanten Einfluss haben. Um die Ergebnisse beim Einsatz neuer Reifen vergleichen zu können, wird empfohlen, einen Sommerreifen einzusetzen, der über ähnliche resultierende Oberflächentemperaturen wie Reifen Nr. 5 verfügt, sodass ein Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit aufgrund des Reifens ausschließen zu können.

## **6.5 Einfluss der Deckversiegelung auf die Verschleißbeständigkeit**

### **6.5.1 Allgemeines**

Die Deckversiegelung ist die oberste, abschließende Schicht des Oberflächenschutzsystems und spielt daher eine wesentliche Rolle hinsichtlich des Verschleißverhaltens des gesamten Schutzsystems. Sie soll den Abrieb möglichst gering halten und die Quarzkörner der darunterliegenden Schicht in das System so einbinden, dass ein Abtrag dieser verhindert wird. Um dies zu gewährleisten, weist i. d. R. die Deckversiegelung eine höhere Festigkeit auf. Den Einfluss von Deckversiegelungen auf das Abnutzungsverhalten zeigten bereits die Untersuchungen am Bänziger Rad [Zilg et al. - 2008]. Hier konnte gezeigt werden, dass das Abriebverhalten der Versiegelungsschicht umgekehrt proportional zu ihrer Zähigkeit ist. Dies bedeutet, dass die Verschleißstärke von zähelastischen Polyurethanen über Epoxidharze bis hin zu flexiblen und weniger zähen Polyurethanen zunimmt.

In den nachfolgenden Untersuchungen wurde der Einfluss der Deckversiegelung auf die Verschleißbeständigkeit gegenüber einem nicht versiegelten System untersucht. Die Untersuchung erfolgte an drei Probekörpern (Tab. 6.6). Bei einem System handelt es sich um ein OS 8-System, welches generell zu den verschleißärmeren zählt, und zwei OS 11b-Systemen, die zu den verschleißstärkeren zählen. Die Deckversiegelung wurde jeweils nur über die Hälfte des Probekörpers aufgebracht. Damit war sichergestellt, dass der darunterliegende Systemaufbau identisch war.

Tab. 6.6: Probekörper Vergleich mit / ohne Deckversiegelung

Probekörper	Oberflächenschutzsystem
P1	OS 11b
P2	OS 11b
P3	OS 8

### **6.5.2 Ergebnisse**

Bei den Probekörpern P1 und P2 (Abb. 6.10 und Abb. 6.11) konnte sowohl mit als auch ohne Deckversiegelung ein Tiefenabtrag dokumentiert werden. Bei beiden Probenkörpern lag ein Verschleiß in der Verschleißschicht vor. Bei P1 zeigte sich, dass durch die Deckversiegelung der Verschleiß anfangs verzögert einsetzt, doch nach dessen Abtrag im gleichen Verhältnis voranschritt wie bei der versiegelten Oberfläche von P2 und nach 15.000 Zyklen gleich stark ist. P2 mit Deckversiegelung war dagegen zunächst deutlich robuster als ohne Deckversiegelung. Bis 7.500 Zyklen fand an P2 mit Deckversiegelung kein Materialabtrag statt, vielmehr war eine Haftung des Reifens

zu verzeichnen, sodass es zu einem Auftrag des Gummiabriebs kam. Danach setzte der Verschleiß an der versiegelten Probekörperhälfte ein. Dieser war dann stärker als ohne Deckversiegelung. P2 war ein elastisches System, bei dem die Verschleißschicht weicher als die Deckversiegelung war. Durch die Drehbewegung des Reifens wurde die Deckversiegelung aufgrund ihrer Robustheit nicht abgetragen und auch die Quarzkörner konnten nicht „herausgerieben“ werden. Vielmehr ist davon auszugehen, dass durch die Rotation auf der Stelle das System im Inneren den Schubspannungen nicht standhalten konnte. Für dieses Schadensbild spricht zusätzlich, dass der Verschleiß erst sehr spät einsetzte. Sind die einzelnen Quarzkörner erst einmal herausgerieben, findet ein kontinuierlicher Verschleißprozess statt.

Generell kann festgestellt werden, dass die Quarzkörner bei rissüberbrückenden Systemen aufgrund der Elastizität des Systems nicht so stabil in der hWO verankert sind wie bei den starren Systemen. Die rissüberbrückenden Systeme können daher den Scherkräften nicht den gleichen Widerstand entgegensetzen und die Abstreitung kann leichter „herausgewackelt“ werden. Wegen der ohnehin geringeren Festigkeit der einzelnen Komponenten des Oberflächenschutzsystems (OS 11) erfolgt zusätzlicher Materialabtrag am eingebundenen Quarzsand. Wird die verhältnismäßig steifere Deckschicht in einer dickeren Schicht aufgetragen, dann verliert das System an Oberflächenrauheit. Dies kann später ein Versagen „im Inneren“ des Systems begünstigen bzw. auslösen. Eine Optimierungsmöglichkeit bei den elastischen Systemen kann die Applikation einer doppelten Deckversiegelung sein, bei der die erste Schicht mit Quarzsand abgestreut wird. Ziel hierbei muss es sein, dass die Deckversiegelung die meisten Kräfte aufnehmen kann und entsprechend steif ist. Mögliche Anrisse der Deckversiegelung werden sich dabei nicht vermeiden lassen.

Bei P3 trat weder mit noch ohne Deckversiegelung nennenswerter Verschleiß auf. Lediglich die Kornspitzen wurden abgefahren. Bei P3 war jedoch auffällig, dass die Mindestschichtdicken bei der Applikation nicht eingehalten wurden, was in der Praxis einen Mangel darstellen würde. Vergleichend ist der maximale Tiefenabtrag in Abb. 6.10 und der Volumenabtrag in Abb. 6.11 dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse sowie die Visualisierungen können Tab. 6.9 bzw. Abb. 8.57 bis Abb. 8.74 sowie bis Tab. 8.63 im Anhang E entnommen werden.

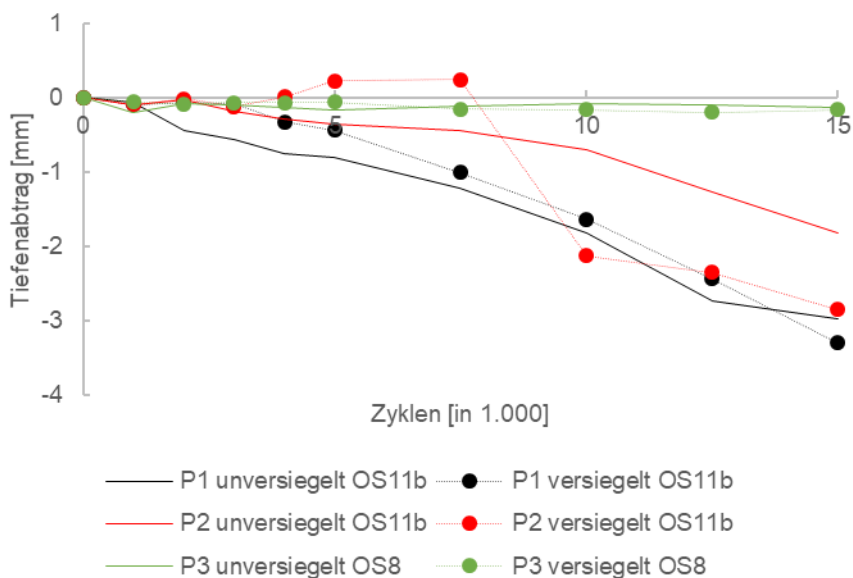


Abb. 6.10: Maximaler Tiefenabtrag im Vergleich mit / ohne Deckversiegelung

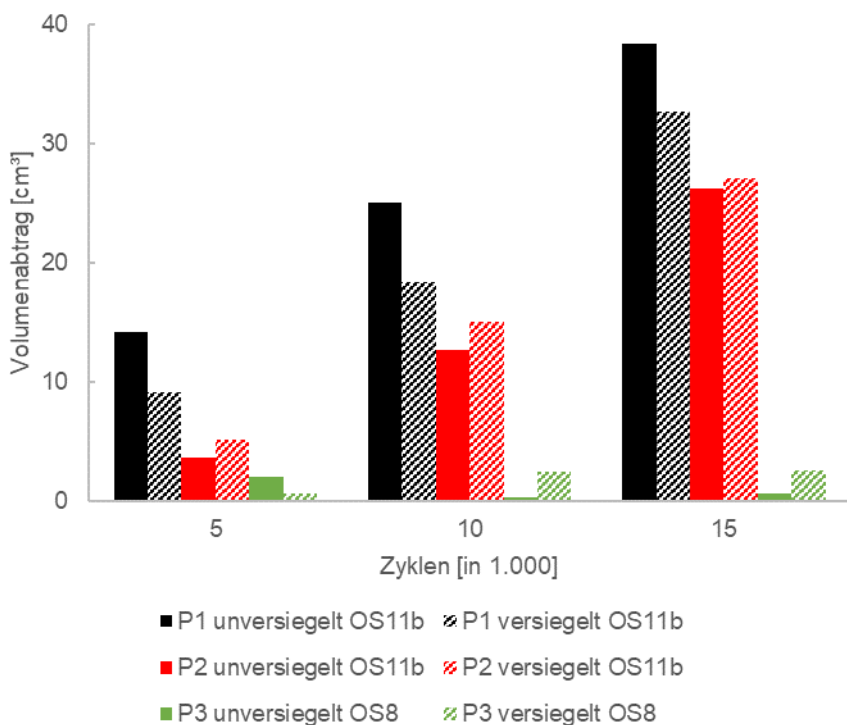


Abb. 6.11: Volumenabtrag im Vergleich mit / ohne Deckversiegelung

Neben der Laserauswertung wurden zusätzlich Bohrkernproben entnommen, an denen an Feinschnitten unter dem Mikroskop ebenfalls die Schichtdicken ermittelt wurden. Diese Ergebnisse sind in Tab. 6.7 dargestellt und in Tab. 6.8 in die entsprechende Verschleißkategorien eingeteilt. Die Bohrkernproben wurden an der Stelle mit dem optisch stärksten Abtrag entnommen. Aufgrund des manuellen Aufbringens des Beschichtungssystems können die Schichtdicken über die Fläche des Probekörpers schwanken. Dies ist bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Ergebnisse zwischen der Bohrkernentnahme und der Laseraufnahme korrelieren daher nicht immer. Dies begründet sich z. T. in der Differenz der Höhe eines Quarzkornes sowie der flächig u. U. nicht ganz homogenen Auftrags- und damit ggf. auch Abtragsmengen (sollte keine planebene Oberfläche vorliegen).

Tab. 6.7: Schichtdicken und Abtragstiefen mit / ohne Deckversiegelung nach 15.000 Zyklen

Schichtdicken und Abtragstiefen			
Schichtdicke bei 0 Z	Restschichtdicke bei 15.000 Z	Maximale Abtragstiefe $A_{BK}$	Maximale Abtragstiefe $A_L$
P1 (OS 11b)			
ohne Deckversiegelung			
4,5 mm	1,2 mm	3,3 mm (73 %)	2,97 mm (66 %)
mit Deckversiegelung			
5,0 mm	2,0 mm	3,0 mm (60 %)	3,30 mm (66 %)
P2 (OS 11b)			
ohne Deckversiegelung			
4,0 mm	1,3 mm	1,7 mm (43 %)	1,83 mm (46 %)
mit Deckversiegelung			
4,5 mm	2,5 mm	2,5 mm (55 %)	2,86 mm (64 %)
P3 (OS 8)			
ohne Deckversiegelung			
1,3 mm	1,2 mm	0,1 mm (8 %)	0,13 mm (10 %)
mit Deckversiegelung			
1,6 mm	1,6 mm	0 mm (0 %)	0,16 mm (10 %)
$A_{BK}$ : Maximale Abtragstiefe gemessen an einer Bohrkernprobe			
$A_L$ : Maximale Abtragstiefe durch Lasermessung			

Tab. 6.8: Verschleißkategorie mit / ohne Deckversiegelung nach 15.000 Zyklen

Probekörper	Verschleißkategorie	
	ohne Deckversiegelung	mit Deckversiegelung
P1 (OS 11b)	VK 5	VK 5
P2 (OS 11b)	VK 4	VK 5
P3 (OS 8)	VK 1	VK 1



### **6.5.3 Schlussfolgerung**

Die Deckversiegelung hatte bei dem starren OS 8-System keinen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit, da alle Schichten ähnliche Materialeigenschaften aufwiesen und nicht elastifiziert sind. Das Verschleißverhalten von elastischen Oberflächenschutzsystemen wird von der Deckversiegelung jedoch stark beeinflusst. Dies macht sich v. a. zu Beginn bemerkbar, solange die intakte Versiegelung den Verschleiß verhindert. Nach der Zerstörung der Versiegelung, bis zum Erreichen der 15.000 Zyklen, konnte entweder kein signifikanter Unterschied festgestellt werden oder der Verschleiß an den Probekörpern mit Deckversiegelung war sogar stärker. Es ist davon auszugehen, dass die resultierenden Schubkräfte von der darunterliegenden Verschleißschicht nicht aufgenommen werden konnten. Damit kam es später zu einem großflächigeren Versagen des Oberflächenschutzsystems. Dies wird auch am Ausmaß des Volumenabtrags deutlich. Bei den elastischen Probekörpern wurde ebenfalls deutlich, dass die Deckversiegelung hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des Systems nur bedingt beitragen kann.

Tab. 6.9: Abtragstiefen und Volumenabtrag mit / ohne Deckversiegelung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl

		Zyklenanzahl								
		1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	7.500	10.000	12.500	15.000
Max. Abtragstiefe A <sub>L</sub> [mm]	P1 unversiegelt	-0,05	-0,44	-0,56	-0,74	-0,80	-1,22	-1,82	-2,74	-2,97
	P1 versiegelt	-0,09	-0,06	-0,08	-0,33	-0,43	-1,01	-1,63	-2,43	-3,30
	P2 unversiegelt	-0,09	-0,03	-0,19	-0,28	-0,36	-0,45	-0,69	-1,26	-1,83
	P2 versiegelt	-0,09	-0,02	-0,12	0,01	0,23	0,25	-2,13	-2,35	-2,86
	P3 unversiegelt	-0,19	-0,07	-0,09	-0,13	-0,16	-0,11	-0,07	-0,10	-0,13
	P3 versiegelt	-0,06	-0,08	-0,07	-0,07	-0,06	-0,15	-0,16	-0,20	-0,16
Volumen- abtrag [cm³]	P1 unversiegelt	2,40	4,02	5,87	9,41	14,23	18,90	24,99	32,34	38,30
	P1 versiegelt	2,06	2,15	3,94	7,06	9,18	13,02	18,42	26,49	32,71
	P2 unversiegelt	1,62	0,28	1,87	3,30	3,71	7,07	12,68	19,80	26,24
	P2 versiegelt	0,10	-0,69	3,05	3,97	5,22	9,84	15,09	22,84	27,10
	P3 unversiegelt	3,28	1,28	0,98	2,01	2,07	1,77	0,29	1,44	0,64
	P3 versiegelt	0,46	0,92	0,85	0,61	0,66	2,48	2,49	3,23	2,61
Volumen- abtrag/ Radauf- standsfläche [mm]	P1 unversiegelt	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,11	0,14	0,17
	P1 versiegelt	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,12	0,14
	P2 unversiegelt	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,06	0,09	0,12
	P2 versiegelt	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,10	0,12
	P3 unversiegelt	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
	P3 versiegelt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01

## 6.6 Zugmodule nach DIN ISO 527-2

### 6.6.1 Allgemeines

Materialkennwerte können einen Hinweis auf die Beständigkeit von Produkten geben. Während für die einzelnen polymeren Werkstoffe Bereiche für die Festigkeiten in der Literatur wiederzufinden sind, wird über Kunststoff-Quarzsand-Mischprodukte keine Aussage getroffen. Aus diesem Grund wurden mechanische Materialkennwerte wie Zugmodule und -festigkeiten nach [DIN ISO 527-2] an Zugproben des Typs 1B (Abb. 6.12) ermittelt, bei dem die Proben einaxial beansprucht werden. Ziel dieser Versuche war es, weitere Materialkennwerte in relativ einfach durchführbaren Versuchen zu erhalten, um den Einfluss vom Quarzsand besser abschätzen zu können und den Einfluss von Feuchtigkeit zu untersuchen. Weiterhin sollte der Einfluss von Quarzsand auf die Festigkeiten und Flexibilität des Systems untersucht werden. Die Prüfungen wurden in Anlehnung an [DIN ISO 527-2] durchgeführt. Hierbei wurden zunächst an sieben verschiedenen Einzelkomponenten von Oberflächenschutzsystemen die Materialkennwerte wie Zugmodul, Zugfestigkeit, Bruchfestigkeit, Dehnung der Zugfestigkeit und Bruchdehnung ermittelt. Es wurden sowohl die Grundkomponenten allein als auch Kombinationen mit Abstreuerung und Verfüllung geprüft, sodass sich in Summe zwölf Kombinationen ergeben haben (Tab. 6.10, ([Ladner et al. - 2016], [Ladner u. Breit - 2017a], [Ladner u. Breit - 2017b], [Ladner - 2017])). Anschließend wurden diese Versuche an sieben kompletten Systemen wiederholt.

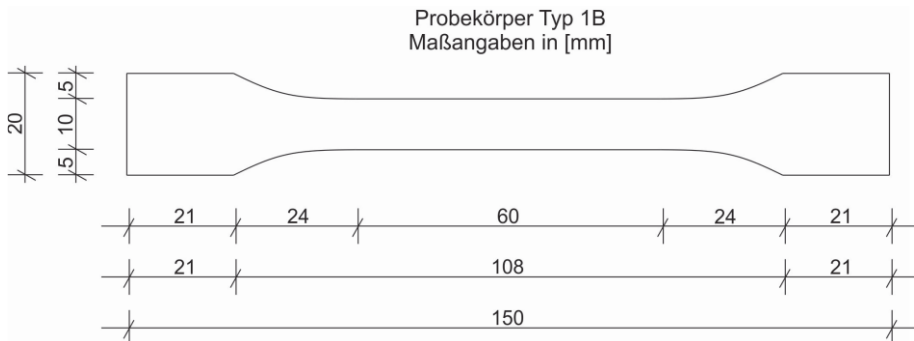


Abb. 6.12: Probengeometrie der Zugproben

### 6.6.2 Durchführung

Die Dokumentation der Längenänderungen erfolgte mittels eines optischen Dehnungsmesssystems, das die Längenänderungen berührungslos und optisch aufzeichnete (Extensometer aus drei CMOS-Kameras). Aufgezeichnet wurden Kraft-Verlängerungsdiagramme, die in einer csv-Datei ausgegeben wurden. Für die Dokumentation per Extensometer wurde die Oberfläche der Zugproben (Abb. 6.12) im Vorfeld mit einem mattblauen Spray eingefärbt, da die glänzende Oberfläche zu Messfehlern und -ungenauigkeiten aufgrund des Glanzes führen kann. Anschließend wurde die Oberfläche der Proben zusätzlich mit Graphitspray mit einer unregelmäßigen Punktelwolke markiert, da dieses sich bei der Probekörperdehnung nicht verformt. Dokumentiert wurden die Längenänderungen an drei Punktepaares.

Mit Ausnahme von den hochelastischen Probekörpern, wurden die Proben bis zum Bruch geprüft. Für die Bestimmung des Zugmoduls hatte dies keine Auswirkung, jedoch konnten an diesen Probekörpern die Bruchfestigkeit sowie die Bruchdehnung nicht ermittelt werden.

Tab. 6.10: Übersicht Probekörper Zugversuche Einzelkomponenten

Komponente	Nr.	Material	Anwendungsbereich	Bemerkung
1	A	EP	Grundierung	abgestreut
	B			-
2	C	EP	Grundierung	-
	D			abgestreut
3	E	PUR	Schwimmschicht	-
	F		Verschleißschicht	abgestreut und verfüllt
4	G	PUR	Deckversiegelung	-
5	H	PUR	Verschleißschicht	-
	K			abgestreut und verfüllt
	L			abgestreut
6	M	EP	Deckversiegelung	-
7	N	PUR	Schwimmschicht	-
Abstreuerung mit Quarzsand 0,3 bis 0,8 mm				
Verfüllung mit Quarzsand 0,1 bis 0,3 mm (20 %)				

Im Anschluss daran wurden analog die Materialkennwerte für die Materialien im System bestimmt (Tab. 6.11). Diese wurden bei Normalklima sowie unter Wassersättigung geprüft. Die angegebenen Dicken (Mittelwert) der Probekörper wurden mittels Messschieber ermittelt, die Rauigkeit der Oberfläche wurde nicht berücksichtigt.

Tab. 6.11: Übersicht Probekörper Zugversuche im System

Nr.	Systemart	Systemaufbau	Dicke [mm]
O	OS 11a	D-E-K-G	5,6
P	OS 11a	A-E-K-G	5,4
Q	OS 11b	D-F-G	4,0
R	OS 11b	A-F-G	4,5
S	OS 13	D-K-G	4,7
T	OS 8	D-M	3,7
U	OS 13	A-K-G	3,7

Zunächst wurden von den einzelnen Komponenten Zugproben hergestellt. Es wurden dabei sowohl an den Grundmaterialien als auch, sofern im System vorgesehen, an abgestreuten und verfüllten Probekörpern die Materialeigenschaften bestimmt. Dabei wurden nachfolgende Parameter variiert:

- Prüfgeschwindigkeit (0,1 mm/min, 1 mm/min, 10 mm/min); aufgrund der unterschiedlich zu erwartenden Zugmodule (zäh-elastisch bis spröde)
- Lagerungsbedingungen: Normalklima, Wasserbad bis zu Wassersättigung und bei 70 °C (es wurde angenommen, dass bei dieser Temperatur eine Nachvernetzung der Kunstharze stattfindet)
- 3 %iger NaCl-Lösung zur Simulation der winterlichen Bedingungen (Wassereintrag durch Schnee-Salz-Gemisch)

Im Anschluss wurden die Materialkennwerte am Gesamtsystem unter gleichen Lagerungs- und Prüfbedingungen bestimmt.

### 6.6.3 Ergebnisse

In [DIN EN ISO 527-1] werden vier verschiedene Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschieden:

- Sprödes Materialverhalten, Versagen bei niedrigen Dehnungen (a)
- Werkstoffe, bei denen die Streckspannung geringer ist als die maximal erreichbare Spannung und bei denen ggf. ein Zuwachs der Dehnung erfolgt ohne eine Steigerung der Spannung (b und c, i. d. R. Thermoplaste)
- Gummiähnliche Werkstoffe, welche erst nach Erreichen von 50 % der Dehnungswerte versagen (d)

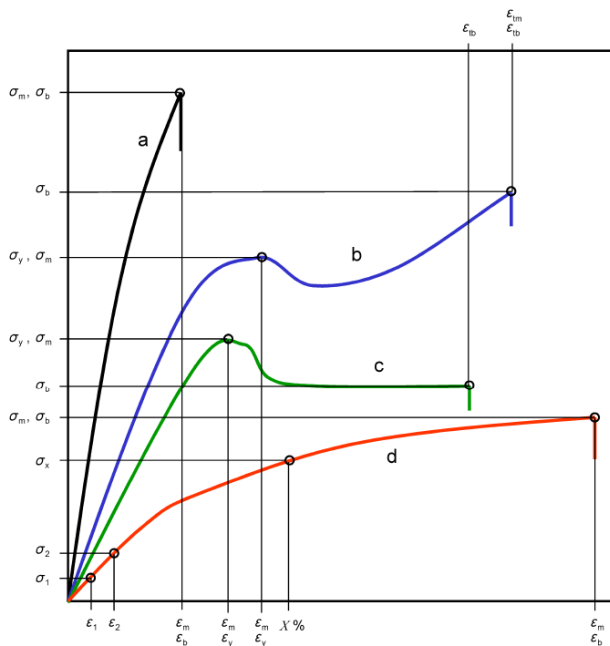


Abb. 6.13: Typische Spannungs-Dehnungskurven aus [DIN EN ISO 527-1]

Erwartungsgemäß verfügten die Komponenten E, H und N über Dehnungswerte von über 50 % und zählen damit zu den gummiähnlichen Werkstoffen (d). Die restlichen Komponenten sind eher den spröden, glasartigen Kunststoffen zuzuordnen (a). In

Abhängigkeit von der Lagerungsart können Materialeigenschaften sehr stark variieren. Die meisten Komponenten sind den Duroplasten zuzuordnen. Eine Ausnahme hiervon bilden die hochelastischen Polymere E und N, die als Schwimmschicht verwendet werden und zu den Elastomeren zählen.

Aufgrund des nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Kunststoffen, wurde die Steigung zwischen 0,05 und 0,25 %-Dehnung ersatzweise für die Bestimmung des Zugmoduls herangezogen. Die drei Messpunktpaare wurden im Abstand von 20 mm, 40 mm und 60 mm gesetzt. Die absoluten Dehnungen können Tab. 6.12 entnommen werden. Kleine Unregelmäßigkeiten werden in diesen Messbereichen deutlich sichtbar und verfälschen die Ergebnisse. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve kann daher in diesem Dehnungsbereich sehr ungleichmäßig sein. Bei hochelastischen Materialien (i. d. R. Schwimmschicht) war aufgrund der großen Messschwankungen keine Ermittlung in diesem Bereich möglich. Diese erfolgte daher alternativ aus der Sekantensteigung in einem Dehnungsbereich von 0 bis 5 %.

Tab. 6.12: Dehnungsbereiche der Zugversuche

Abstand Messpunktpaar	Absolute Dehnung
20 mm	0,01 bis 0,05 mm
40 mm	0,02 bis 0,1 mm
60 mm	0,03 bis 0,15 mm

Erwartungsgemäß führten höhere Prüfgeschwindigkeiten i. d. R. zu höheren Festigkeiten. Weiterhin sichtbar wurde, dass die Zugmodule zwischen 3 und 3.500 N/mm<sup>2</sup> lagen. Die Wassersättigung führte zu einem deutlichen Abfall des Zugmoduls, z. T. um bis zu 50 %. Die Lagerung der Probekörper bei höheren Temperaturen ließ keinen eindeutigen Trend erkennen. Die Abstreuerung oder Verfüllung mit Quarzsand führte ebenfalls erwartungsgemäß zu einem Anstieg des Zugmoduls. Die bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min ermittelten Zugmodule sind in Abb. 6.14 dargestellt. Die Einzelwerte können Anhang F entnommen werden.

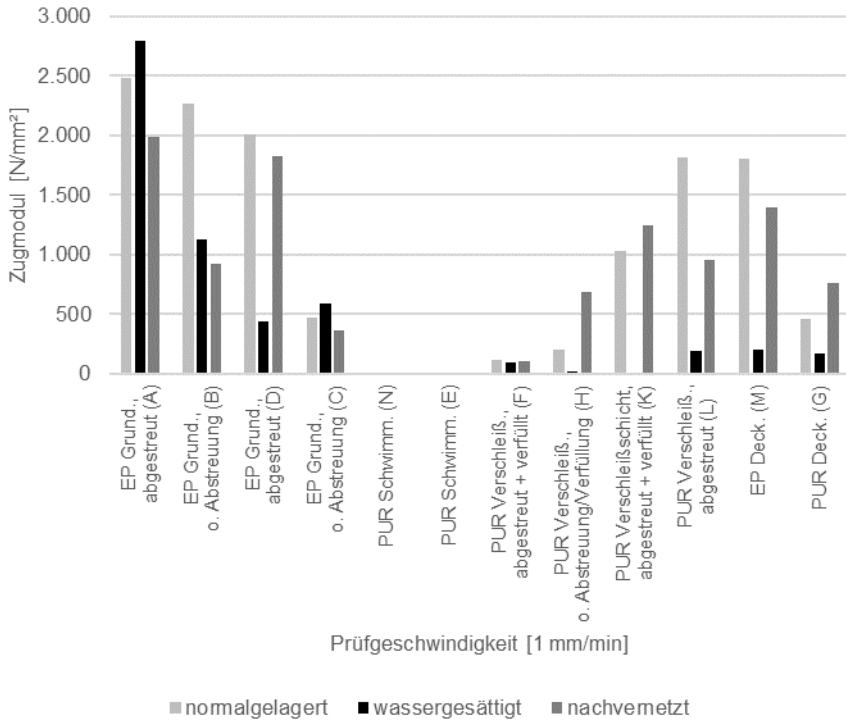


Abb. 6.14: Vergleich der Zugmodule an den Einzelkomponenten von Oberflächenschutzsystemen ggf. zusätzlich mit einer Abstreuerung bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min und unterschiedlichen Lagerungsbedingungen

Die Ermittlung der Dehnung der Zugfestigkeit erfolgt am ersten Spannungsmaximum. Dies hat zur Folge, dass es sich hierbei um die Bruch- als auch Streckspannung handeln kann. Eine Aussage über die Dehnbarkeit der Materialien war hieraus nicht ableitbar bzw. nur eingeschränkt möglich. Bei der Zugfestigkeit stieg analog zum Zugmodul mit steigender Prüfgeschwindigkeit die maximal erreichbare Spannung (Abb. 6.15 bzw. Tab. 8.67). Die Zugfestigkeiten erreichten einen maximalen Wert von 48,2 N/mm². Auch hier wurde der Festigkeitsverlust bei Wasserlagerung deutlich sichtbar (Abb. 6.16). Bei den spröden Kunststoffen sind die ermittelten Festigkeiten bei der Bruchdehnung gleichzeitig auch die Zugfestigkeiten.

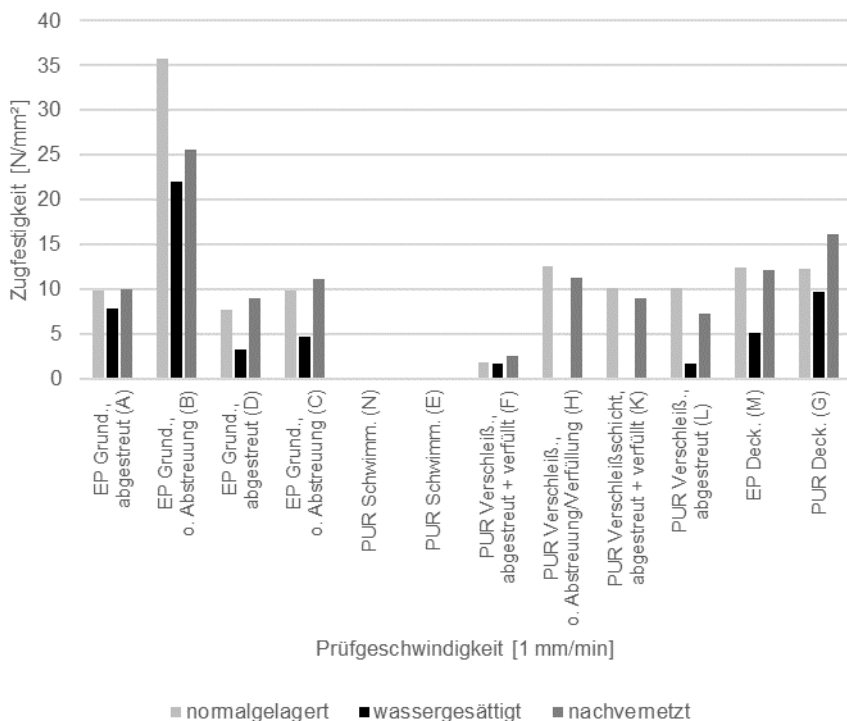


Abb. 6.15: Vergleich der Zugfestigkeiten an den Einzelkomponenten von Oberflächenschutzsystemen ggf. zusätzlich mit einer Abstreuerung bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min und unterschiedlichen Lagerungsbedingungen



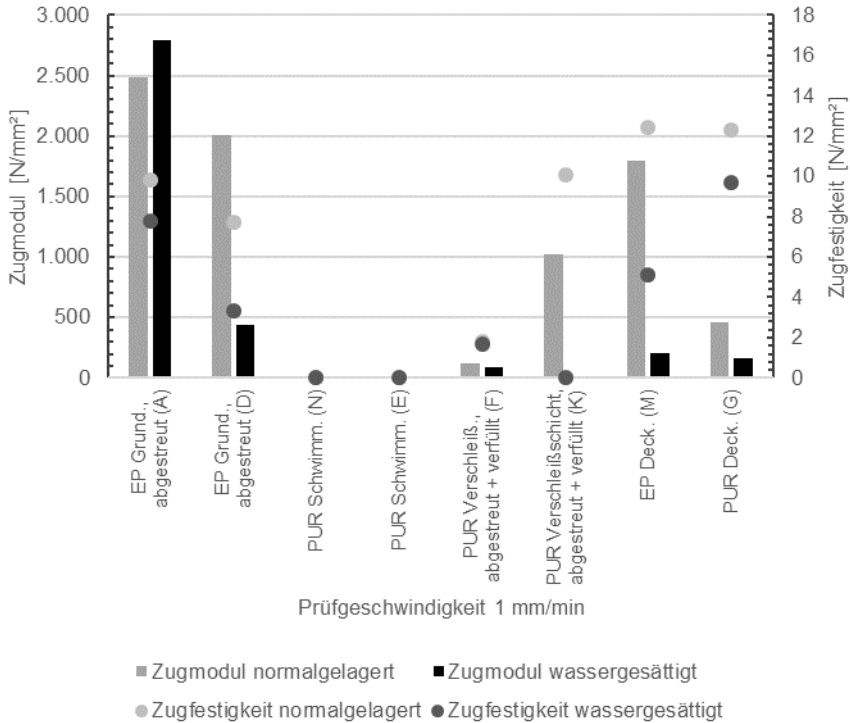


Abb. 6.16: Festigkeiten in Abhängigkeit der Lagerung bei Zugfestigkeit und Zugmodul (Einzelkomponenten)

Bei der Prüfung der Materialkennwerte am Gesamtsystem wies das starre OS 8-System mit einer Epoxidharz-Grundierung und Epoxidharz-Deckversiegelung die höchsten Festigkeitswerte und Zugmodule auf. Am OS 8-System konnten deutlich höhere Festigkeiten aufgenommen werden als an den beiden jeweiligen Einzelkomponenten. Sowohl bei diesem als auch bei allen anderen Systemen war erneut erkennbar, dass bei Wassersättigung z. T. nur noch 20 % der Festigkeiten der Normallagerung erreicht wurden (Abb. 6.17 sowie Tab. 8.68 und Tab. 8.69 in Anhang F).

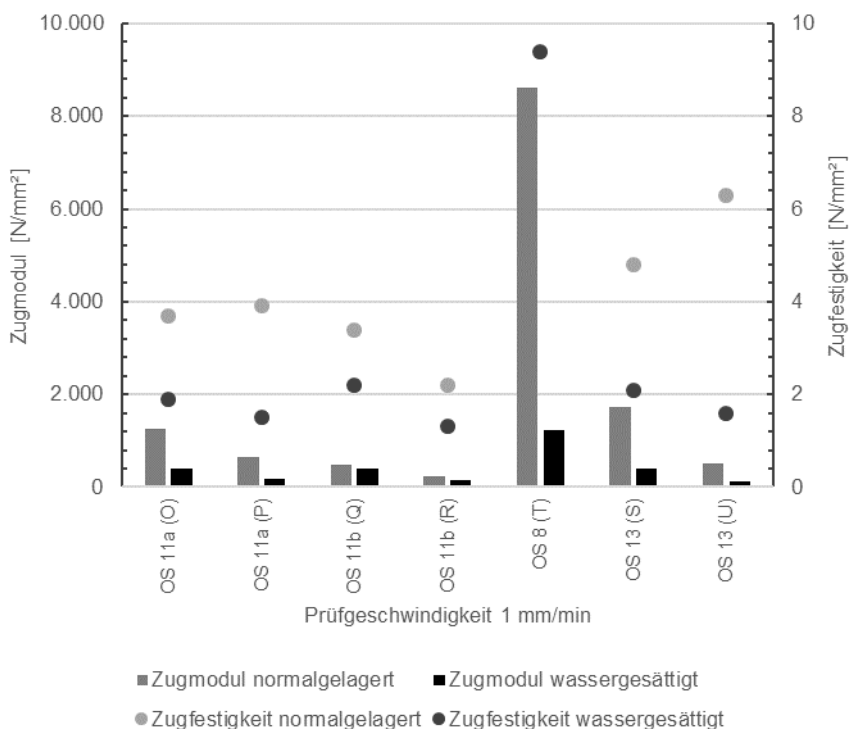


Abb. 6.17: Festigkeiten in Abhängigkeit der Lagerung bei Zugfestigkeit und Zugmodul (System)

Die weiteren Systeme verfügten über eine Polyurethan-Deckversiegelung. Ansonsten unterschieden sich der Systemaufbau der OS 11a-, OS 11b- und OS 13-Systeme nur in der Grundierung. Die Systemaufbauten mit der Grundierung D wiesen meistens die höheren Zugmodule auf, wenngleich auch nur in geringem Ausmaß. Auch die Festigkeiten unterschieden sich nicht nennenswert zwischen den OS 11a- und OS 11b-Systemen. Festigkeiten im Zwischenbereich zwischen den elastischen OS 11-Systemen und dem starren OS 8-System zeigten die beiden OS 13-Systeme. Auffällig bei den OS 11a-Systemen war, dass es hier nicht zum kompletten Bruch kam. Nachdem die steiferen Schichten versagt hatten, löste sich die Schwimmschicht kontinuierlich von den anderen Schichten ab.

#### 6.6.4 Schlussfolgerung

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Epoxidharze sind engmaschige und spröde, glasartige Kunststoffe, die über höhere Festigkeiten und Zugmodule als Polyurethane verfügen. Polyurethane sind dahingegen, aufgrund der weitmaschigeren Vernetzung, deutlich dehnfähiger. Dies wurde in den Ergebnissen deutlich sichtbar. Die hochelastischen Polyurethane (Elastomere), welche als Schwimmschicht und damit vorwiegend zur Rissüberbrückung eingesetzt werden, weisen die größte Dehnfähigkeit mit zugleich den niedrigsten Festigkeiten auf.

Die Verwendung von Quarzsand führte zu höheren Zugmodulen (größere Steigung), wenngleich bei den Epoxidharzen die höheren Zugfestigkeiten ohne Quarzsand erreicht wurden. Analog verhielten sich die Polyurethane hinsichtlich der Zugfestigkeit. Der Unterschied in der Zugfestigkeit ist allerdings deutlich niedriger. Eine zusätzliche Verfüllung mit einem feinkörnigeren Quarzsand ermöglicht keine weitere Steigerung der Zugfestigkeit. Die Verwendung der Abstreuerung und / oder Verfüllung geht gleichzeitig mit einer Reduzierung der Dehnfähigkeit einher (Abb. 6.18).

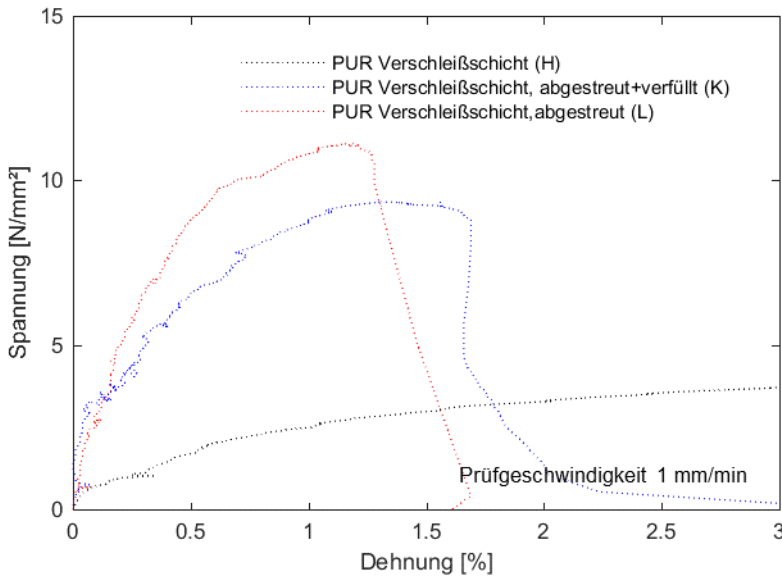


Abb. 6.18: Einfluss des Quarzsandes auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten am Beispiel von den Proben H / K / L mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min

Erwartungsgemäß hat eine höhere Prüfgeschwindigkeit zu höheren Festigkeitswerten und einem geringeren Dehnungsvermögen geführt (Abb. 6.19). Aufgrund der hochelastischen Eigenschaften der Polyurethane hätten niedrigere Prüfgeschwindigkeiten zu nicht verwertbaren Ergebnissen geführt. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden die Prüfungen mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt.

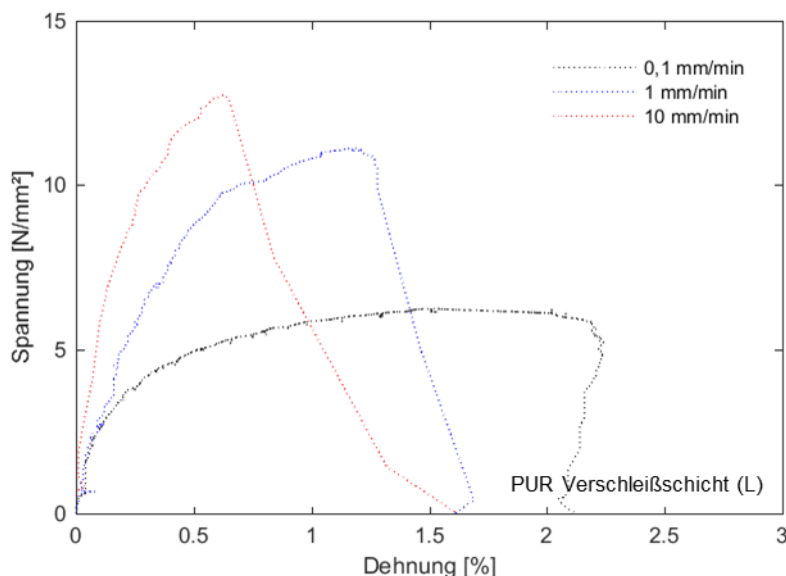


Abb. 6.19: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit am Beispiel von Probe L

Oberflächenschutzsysteme sind in Parkbauten sehr unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt, wobei neben der Temperatur auch die Feuchtigkeit einen enormen Einfluss auf die bautechnisch relevanten Eigenschaften hat. Da über die Materialeigenschaften der verwendeten Kunststoffe wenig bekannt war, erwies es sich als schwierig eine Nachvernetzung bei höheren Temperaturen zu erzielen. Gleichzeitig bestand die Gefahr, dass die Glasübergangstemperatur durch versuchsbedingte Temperaturerhöhungen überschritten wurde. Ein eindeutiges Ergebnis aus den Zugversuchen nach Lagerung bei höheren Temperaturen ließ sich daher nicht ableiten. Eine Wasserbeaufschlagung führte zu einem leichten Quellen der Materialien und einer Verseifung der Probekörper, sodass sowohl die Festigkeiten als auch die Zugmodule deutlich niedriger waren (siehe auch [Littmann u. Pleyers - 2004]). Wird der Sachverhalt berücksichtigt, dass es v. a. in den Wintermonaten oder nach Großregenereignissen in Parkbauten zu Pfützenbildungen kommen kann, dann kann dies einen erheblichen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit haben. Weitere Zugversuche wurden mit einer Beaufschlagung einer 3 %-igen NaCl-Lösung durchgeführt. Diese sollte die im Winter im Wasser gelösten Chloride widerspiegeln. Ein zusätzlicher Einfluss der Chloride konnte nicht festgestellt werden.

Bei der Prüfung im System waren die Zugfestigkeiten und Zugmodule, mit Ausnahme des OS 8-Systems, niedriger als die der Einzelkomponenten. Auch am Gesamtsystem war eine Reaktion auf die Wasserbeaufschlagung sichtbar geworden. Die Festigkeiten der OS 11a- und OS 11b-Systeme waren nachweislich am niedrigsten, was mit der höchsten Rissüberbrückungsfähigkeit (größte Elastizität) einhergeht. Gleichzeitig bedeuten niedrige Festigkeiten allerdings auch eine niedrigere Verschleißbeständigkeit. Die Steifigkeit der Deckversiegelung beeinflusst maßgebend

die Verschleißbeständigkeit von Oberflächenschutzsystemen. Ist diese zu niedrig, neigt das System leicht zu einem kontinuierlichen Verschleiß. Verfügt das System über eine dünne Deckversiegelung mit hohen Festigkeitswerten, hat dies ebenfalls einen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit: Das System wird plötzlich versagen, wenn die Schubkräfte durch die Rotation der Reifen im Parking Abrasion Test von den darunterliegenden Schichten nicht mehr aufgenommen werden können. Hier wird das System anschließend „im Inneren“ versagen. Für eine hohe Verschleißbeständigkeit sollten die Zugmodule  $> 3.500 \text{ N/mm}^2$  und die Zugfestigkeiten  $> 2 \text{ N/mm}^2$  betragen. Die Systeme, die diese Festigkeiten aufwiesen, waren bei den anschließenden Versuchen mit dem Parking Abrasion Test sehr robust bzgl. Verschleißbeanspruchungen.

Für die Verschleißsimulation des Parking Abrasion Verfahrens in einem Finite Elemente Modell können diese Werte zukünftig ebenfalls herangezogen werden. Aufgrund der Komplexität der Thematik stellt dies einen eigenen Forschungsschwerpunkt dar. Erste Ansätze für ein Modell wurden in [Breit et al. - 2015a] dargestellt, in dieser Arbeit jedoch nicht weiter vertieft.

## **6.7 Einfluss einer Wasserbeaufschlagung auf die Verschleißbeständigkeit**

### **6.7.1 Allgemeines**

Nach einem Starkregenereignis und vor allem in den Wintermonaten werden viele Liter (z. T. chloridhaltiges) Wasser in ein Parkhaus eingetragen, das bei unzureichender Entwässerung über einen längeren Zeitraum (mehrere Tage) auf der Oberfläche des Beschichtungssystem verbleibt. Ein Einfluss der Wasserbeaufschlagung auf die Verschleißbeständigkeit wurde daher in diesem Abschnitt untersucht. Hierfür wurden zunächst fünf verschiedene Probekörper (Tab. 6.13) bei Raumklima mit dem Parking Abrasion Test geprüft. Anschließend wurden diese Probekörper für sieben Tage in einem Wasserbad (Leitungswasser) bis zur Wassersättigung gelagert und anschließend, wie in Abb. 6.20 dargestellt, erneut geprüft. Der Probekörper wurde auch während der Prüfung in einer mit Wasser gefüllten Edelstahlwanne gelagert. Dabei stand das Wasser ca. 4 mm über der Oberfläche des Probekörpers. Für die anschließende Lasermessung und die fotografische Aufnahme wurden die Probekörper aus dem Wasserbad herausgenommen und die Oberfläche mit einem Tuch abgetupft.

Tab. 6.13: Probekörper Vergleich nass / trocken

Probekörper	Oberflächenschutzsystem
P1	OS 8
P2	OS 11a
P3	OS 11b
P4	OS 13
P5	OS 10



Abb. 6.20: Prüfaufbau an wassergesättigtem Probekörper mit dem Parking Abrasion Test

### **6.7.2 Ergebnisse**

Die Messergebnisse können detailliert dem Anhang G entnommen werden. In Abb. 6.21 sind der maximale Tiefenabtrag und in Abb. 6.22 der Volumenabtrag aller geprüften Systeme über 15.000 Zyklen dargestellt. Tabellarisch können die Ergebnisse Tab. 6.14 und Tab. 6.15 entnommen werden.

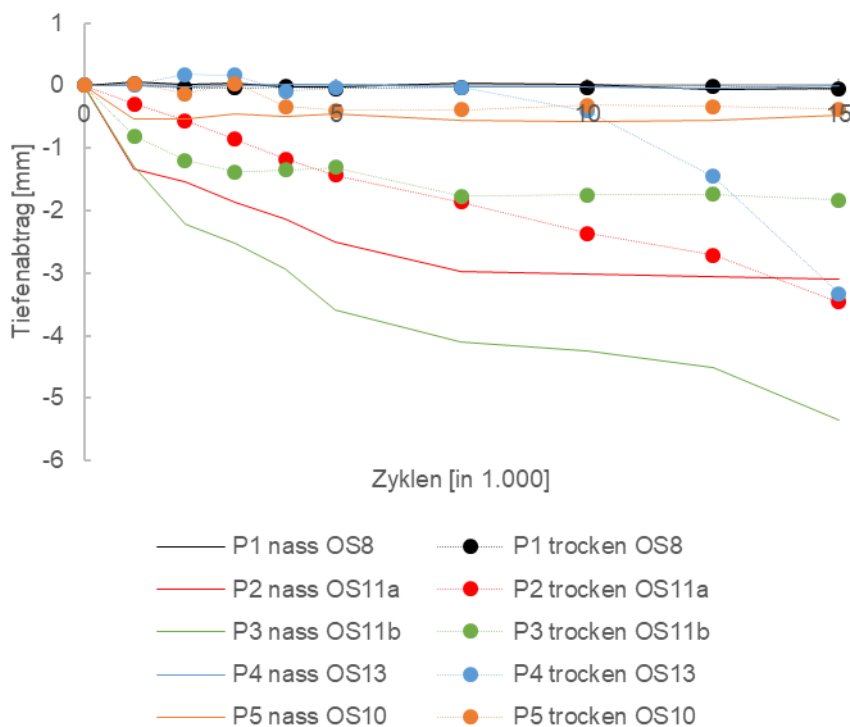


Abb. 6.21: Maximaler Tiefenabtrag im Vergleich nass / trockener Lagerung

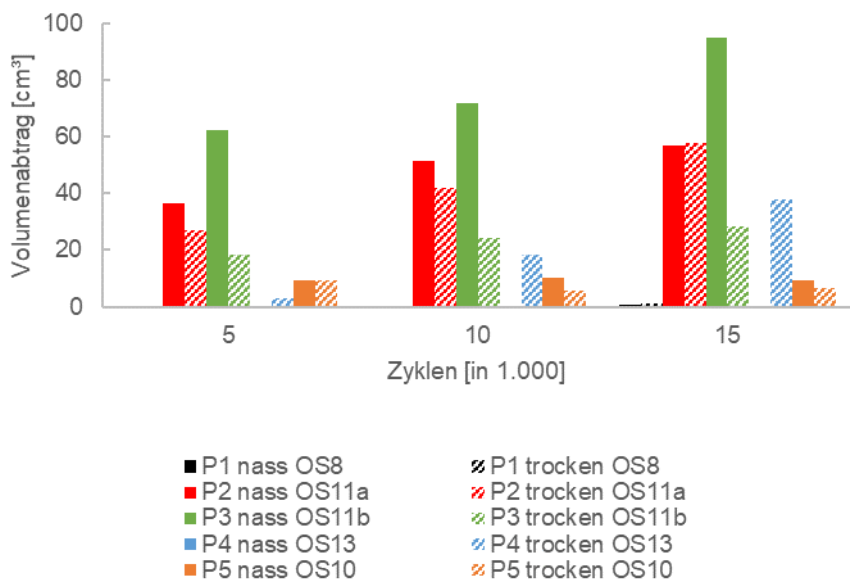


Abb. 6.22: Volumenabtrag im Vergleich nass / trockener Lagerung

Tab. 6.14: Schichtdicken und Abtragstiefen nach nass und trockener Lagerung nach 15.000 Zyklen

Schichtdicken und Abtragstiefen			
Schichtdicke bei 0 Z	Restschichtdicke bei 15.000 Z	Maximale Abtragstiefe $A_{BK}$	Maximale Abtragstiefe $A_L$
P1 (OS 8)			
weder sichtbar noch messbarer Verschleiß			
P2 (OS 11a)			
Nass			
6,63 mm	2,71 mm	3,92 mm (59 %)	3,10 mm (47 %)
Trocken			
6,63 mm	3,01 mm	3,62 mm (55 %)	3,46 mm (52 %)
P3 (OS 11b)			
Nass			
5,55 mm	1,08 mm	4,47 mm (81 %)	5,35 mm (96 %)
Trocken			
5,55 mm	1,96 mm	3,60 mm (65 %)	1,83 mm (33 %)
P4 (OS 13)			
Nass			
3,44 mm	3,48 mm	-0,04 mm (1 %)	0,00 mm (0 %)
Trocken			
3,44 mm	0,19 mm	3,25 mm (95 %)	3,33 mm (97 %)
P5 (OS 10)			
Verschleiß für Auswertung an Bohrkernproben zu gering, lediglich abgefahrene Kornspitzen sind zu erkennen			
$A_{BK}$ : Maximale Abtragstiefe gemessen an einer Bohrkernprobe			
$A_L$ : Maximale Abtragstiefe durch Lasermessung			

Tab. 6.15: Verschleißkategorie nach nass und trockener Lagerung nach 15.000 Zyklen

Probekörper	Verschleißkategorie	
	Nass	trocken
P1 (OS 18)	VK 1	VK 1
P2 (OS 11a)	VK 6	VK 6
P3 (OS 11b)	VK 5	VK 5
P4 (OS 13)	VK 1	VK 6
P5 (OS 10)	VK 1	VK 1

Der mögliche Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit konnte mit dem Parking Abrasion Test nachgewiesen werden. Während bei den Zugversuchen alle Materialien der Versuchsserie auf eine Wasserbeaufschlagung reagierten, konnte ein stärkerer Verschleiß im Parking Abrasion Test nur bei einem Teil der Probekörper nachgewiesen werden. An dem OS 8-System (P1) konnte sowohl bei trockener als auch nasser Lagerung kein Verschleiß festgestellt werden. Bei P 2 (OS 11a) entstand in beiden Prüfungen deutlich sichtbarer Verschleiß. Bei beiden war bereits bei geringer



Belastung der Verschleiß optisch sichtbar. Erwartungsgemäß war die Verschleißstärke bei Wassersättigung höher, da das Oberflächenschutzsystem durch das Wasser leicht verseifte. Dies ist ein Indiz für die Aufnahme von Wasser im Beschichtungssystem. Mit Erreichen der Schwimmschicht (ab 7.500 Zyklen) konnte kein nennenswerter weiterer Verschleiß beobachtet werden. Dieses Verhalten wurde bei im Raumklima gelagerten Probekörpern erst nach 10.000 Zyklen beobachtet. Auch nahm der Verschleiß anschließend noch zu. Auffällig war, dass bei den trocken gelagerten Probekörpern der Reifenabrieb auf dem Oberflächenschutzsystem sehr stark anhaftete.

Ein analoges Verschleißbild ergab sich bei P3 (OS 11b). Bereits nach dem ersten Prüfintervall konnte Verschleiß aufgezeichnet werden, welcher unter Wassersättigung ausgeprägter war. Bei diesem System erfolgte der Verschleiß flächendeckend wie bei P2. Bei dem trockenen P3 Prüfkörper war ebenfalls deutlich erkennbar, dass der Verschleiß in den ersten 7.500 Zyklen bis zum Erreichen des Einlaufverschleißes stärker ausgeprägt war, das tribologische System „eingelaufen“ war und anschließend bis Versuchsende stagnierte. Deutlich wurde dies auch bei der Betrachtung der mikroskopischen Aufnahmen. Die Rauheit war verringert und die Oberfläche im befahrenen Bereich deutlich gleichmäßiger.

P4 war ein OS 13-System, bei dem nur bei trockener Beanspruchung Abrieb festgestellt wurde. Weiterhin auffällig war hier, dass ein messbarer Abrieb erst nach 5.000 Zyklen einsetzte, der sich bis auf die Betonoberfläche fortsetzte. Das plötzliche Versagen dieses weitestgehend starren Systems spricht für ein Versagen im Inneren.

P5 (OS 10) ist ein sehr raues (Abstreuerung durch Splitt) System. Bei beiden Probekörpern war, unabhängig von der Lagerung, Verschleiß feststellbar. Dieser zeichnete sich jedoch nicht in einem nennenswerten Tiefenabtrag aus, sondern lediglich die Kornspitzen wurden abgefahren, sodass anschließend die Oberfläche optisch als matt erschien. Bei beiden Lagerungen war nach 5.000 Zyklen der Einlaufverschleiß erreicht und es konnte kein weiterer dokumentiert werden. Der Verschleiß unter Wassersättigung war minimal höher. Bei mikroskopischen Aufnahmen war ein leichter Abtrag des Bindemittels sichtbar.

### **6.7.3 Schlussfolgerung**

Die einzelnen Ausführungsvarianten der Oberflächenschutzsysteme in Parkbauten nach dem DBV-Merkblatt bzgl. ihrer Robustheit wurden von [Flohrer - 2013] bewertet. Darin heißt es:

„Weiteres Kriterium für die Robustheit eines Parkbaus ist der Widerstand des Oberflächenschutzsystems gegenüber mechanischem Angriff aus der Befahrung. Die Anordnung eines Gefälles und der Einbau einer Entwässerung dagegen erhöhen nicht die Robustheit (Widerstand des Bauwerks gegenüber den Einwirkungen), sondern reduzieren höchstens die Beanspruchung und sind insbesondere Merkmale der Nutzungsfreundlichkeit eines Parkbaus“. (S. 29, [Flohrer - 2013])

Die Ergebnisse dieser Arbeit führen jedoch zu gegenteiligen Feststellungen. Die Verschleißbeständigkeit eines Oberflächenschutzsystems wird reduziert, wenn Systeme nicht nur mechanisch beansprucht, sondern auch die Festigkeit durch eine

Wasserbeaufschlagung reduziert wird. Hierbei muss von einem lösenden / quellenden Angriff nach [Littmann u. Pleyers - 2004] ausgegangen werden.

Ähnliche Ergebnisse lieferten Versuche der Sika Deutschland GmbH zum Verschleißverhalten [Pusel et al. - 2018]. Es wurden an drei verschiedenen Polyurethanen (feuchteempfindliche, marktübliche und i-Cure basierte Beschichtung (spezielle Vernetzungstechnologie von Polyurethanen)) bei unterschiedlichen Klimata die Shore-Härte, Reißdehnung und Zugfestigkeit bestimmt. Die i-Cure-Technologie bindet das Wasser und verhindert dadurch Störungen im System, sodass es zu keinem Einseifen / Aufschäumen, sondern einer kontrollierten Vernetzung kommt. In den standardisierten Verfahren zur Bestimmung mechanischer Kennwerte zeigten sich die Beschichtungen von den klimatischen Verhältnissen unbeeindruckt. Zu beachten ist jedoch, dass die Proben nicht, wie in den Versuchen an der Technischen Universität Kaiserslautern geschehen, bis zur Wassersättigung gelagert wurden. In den anschließenden Verschleißuntersuchungen mit dem Bänziger Rad wurden die Proben bei den gleichen Klimata gelagert wie bei der vorherigen Bestimmung der mechanischen Kennwerte. Hier zeigte sich, dass es bzgl. der Verschleißbeständigkeit deutliche Unterschiede gibt. Bei Normklima ließ sich noch kein nennenswerter Unterschied feststellen. Bei deutlich höherer Luftfeuchtigkeit führte dies dazu, dass die Systeme nach wenigen Prüfzyklen bereits versagten. Lediglich das i-Cure-System ist für derartige Beanspruchungen ausgelegt und konzipiert worden.

Tab. 6.16: Abtragstiefen und Volumenabtrag mit / ohne Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl

		Zyklusanzahl									
		1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	7.500	10.000	12.500	15.000	
Max. Abtragtiefe A <sub>L</sub> [mm]	P1 nass	0,06	0,02	0,04	-0,01	-0,02	0,05	0,01	-0,06	-0,05	
	P1 trocken	0,03	-0,04	-0,04	-0,02	-0,05	-0,02	-0,03	-0,01	-0,06	
	P2 nass	-1,33	-1,53	-1,86	-2,13	-2,49	-2,96	-3,02	-3,06	-3,10	
	P2 trocken	-0,30	-0,56	-0,85	-1,17	-1,43	-1,86	-2,37	-2,72	-3,46	
	P3 nass	-1,30	-2,21	-2,52	-2,93	-3,59	-4,10	-4,25	-4,51	-5,35	
	P3 trocken	-0,81	-1,20	-1,38	-1,35	-1,30	-1,77	-1,75	-1,74	-1,83	
	P4 nass	0,00	-0,03	-0,01	0,02	0,01	-0,02	-0,01	-0,04	0,00	
	P4 trocken	0,01	0,18	0,17	0,09	-0,04	-0,02	-0,40	-1,45	-3,33	
	P5 nass	-0,53	-0,53	-0,44	-0,49	-0,45	-0,56	-0,58	-0,56	-0,48	
	P5 trocken	0,03	-0,13	0,03	-0,33	-0,40	-0,39	-0,31	-0,34	-0,38	
Volumenabtrag [cm³]	P1 nass	-2,30	-0,61	-0,81	0,24	0,25	-0,92	-0,23	1,15	0,96	
	P1 trocken	-1,87	0,32	0,90	0,18	0,34	0,48	0,27	-0,28	1,15	
	P2 nass	22,35	25,44	30,46	32,57	36,28	43,49	51,21	55,50	56,84	
	P2 trocken	4,22	10,56	16,60	22,48	27,19	33,68	41,80	51,50	57,81	
	P3 nass	26,38	45,66	51,97	57,95	62,27	63,89	71,71	81,70	95,02	
	P3 trocken	5,01	12,11	16,53	15,92	18,31	23,15	24,18	26,28	28,20	

Tab. 5.8: Abtragstiefen und Volumenabtrag mit / ohne Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl (Fortsetzung)

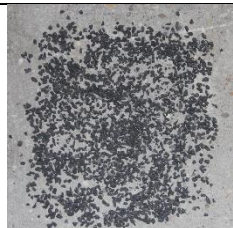
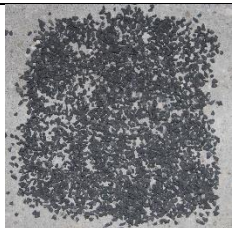
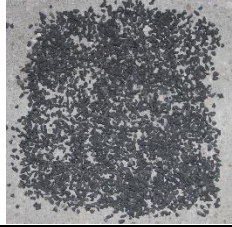

		Zyklenanzahl								
		1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	7.500	10.000	12.500	15.000
Volumenabtrag [cm <sup>3</sup> ]		-0,46	0,40	-0,30	-0,46	-0,77	0,59	0,23	0,62	0,22
	P4 nass									
	P4 trocken	0,29	-1,89	-1,56	0,82	2,84	14,99	18,52	30,10	37,97
	P5 nass	9,27	9,21	9,89	8,89	9,45	11,95	10,16	9,59	9,19
	P5 trocken	-0,81	1,36	0,10	8,63	9,55	8,43	5,66	6,65	6,63
Volumenabtrag/ Radaufstands- fläche [mm]	P1 nass	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
	P1 trocken	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	P2 nass	0,10	0,11	0,13	0,14	0,16	0,19	0,23	0,24	0,25
	P2 trocken	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,18	0,23	0,25
	P3 nass	0,12	0,20	0,23	0,26	0,27	0,28	0,32	0,36	0,42
	P3 trocken	0,02	0,05	0,07	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12
	P4 nass	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	P4 trocken	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,07	0,08	0,13	0,17
	P5 nass	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
	P5 trocken	0,00	0,01	0,00	0,04	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03

## **6.8 Einfluss von Splitt auf die Verschleißbeständigkeit**

### **6.8.1 Allgemeines**

Neben der Feuchtigkeit werden überwiegend in den Wintermonaten über die Reifen auch Verunreinigungen in Form von Sanden und Splitt in das Parkhaus eingetragen. Dieser verbleibt i. d. R. bis zur nächsten Reinigung, die oftmals nur zweimal jährlich stattfindet, auf der Oberfläche und wirkt mit jeder Überfahung abrasiv auf dem Beschichtungssystem. Der Einfluss einer zusätzlichen abrasiven Beanspruchung durch Splitt wurde in weiteren Versuchen nachgestellt und an vier Proben vergleichend untersucht. Die Proben wurden zunächst mit dem Parking Abrasion Test auf ihre Verschleißbeständigkeit geprüft. Anschließend wurde an der gegenüberliegenden Seite auf dem gleichen Probekörper zusätzlich Splitt zwischen PKW-Reifen und Prüffläche aufgebracht. Zur Ermittlung der zu verwendenden Menge an Splitt mit einer Korngröße von 1 bis 3 mm wurden auf einer Fläche von 20 cm x 20 cm unterschiedliche Mengen aufgebracht, die anschließend gewogen wurden (Tab. 6.17).

Tab. 6.17: Ermittlung der Splittmenge für die zusätzliche Beanspruchung mit Splitt beim Parking Abrasion Test

Variante 1  Menge Splitt: 52,6 g		Variante 2  Menge Splitt: 84,1 g	
Variante 3  Menge Splitt: 107,6 g		Variante 4  Menge Splitt: 182,8 g	

Zu beachten ist dabei, dass sich bereits nach den ersten beiden Rotationen des Rades der überwiegende Teil (ca. 95 %) des Splitts außerhalb der Rotationsfläche befand wie in Abb. 6.23 deutlich wird. Variante 1 wurde als Splittmenge für die weiteren Versuche festgelegt, da dies nach der Rotation optisch der Verschmutzung in einem Parkbau am nächsten kam. Die Menge Splitt von 52,6 g wurde mit Beginn jedes Intervalls neu auf die Rotationsfläche auf eine Fläche von 20 cm x 20 cm gleichmäßig verteilt. Aufgrund der höheren Beanspruchung beträgt die Intervalldauer nur 500 Zyklen und der Versuch wird nach 5.000 Zyklen beendet. Die Fläche von 20 cm x 20 cm entspricht in etwa der Radaufstandsfläche.



Abb. 6.23: Verteilung Splitt vor (links) und nach (rechts) einem Versuch mit dem Parking Abrasion Test

Geprüft wurden insgesamt vier Systeme: zwei starre OS 8-Systeme und zwei rissüberbrückende OS 11-Systeme (je ein OS 11a und ein OS 11b, Tab. 6.18). OS 8-Systeme sind generell verschleißarme Systeme, weshalb hier der Fokus auf den Untersuchungen dieser Systeme lag.

Tab. 6.18: Probekörper Vergleich mit / ohne Splittbeanspruchung

Probekörper	Oberflächenschutzsystem
P1	OS 11a
P2	OS 11b
P3	OS 8
P4	OS 8

## 6.8.2 Ergebnisse

In Tab. 6.19 sind die ermittelten maximalen Abtragstiefen gelistet und in Tab. 6.20 erfolgte die Eingruppierung in die Verschleißklassen. Bei allen vier Systemen wurde zusätzlicher Verschleiß durch Splitt erzeugt. Die Abtragstiefen wurden sowohl an Bohrkernproben als auch mit dem Laser ermittelt. Die Resultate decken sich i. d. R. sehr gut miteinander. Aufgrund des stärker erwarteten Verschleißes bei der Splittbeanspruchung erfolgte die Dokumentation in 500 Zyklen-Intervallen. Im Anhang H sind die Auswertungen je System mit und ohne Splittbeanspruchungen gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind sowohl in Diagrammen als auch optisch (Laseraufnahme und Foto) dargestellt. Die Verschleißtiefe wurde in den Diagrammen als lineare Funktion ermittelt.

Nachfolgend sind die maximalen Tiefenabträge (Abb. 6.24) in 1.000 Zyklen-Intervallen für alle Systeme sowie die Volumenabträge (Abb. 6.25) dargestellt. Auffallend bei P3 ist, dass der maximale Tiefenabtrag bei der Splittbeanspruchung höher war als bei der Messung ohne Splitt, sich jedoch der Volumenabtrag nach 5.000 Zyklen entgegengesetzt verhielt. Dies begründet sich darin, dass bei der Beanspruchung mit Splitt kein vollflächiger, sondern eher punktuell ausbreitender Tiefenverschleiß auftrat.

An dieser Stelle konnte sich mehr Splitt ansammeln und das rapide Fortschreiten des Verschleißes dadurch begünstigen.

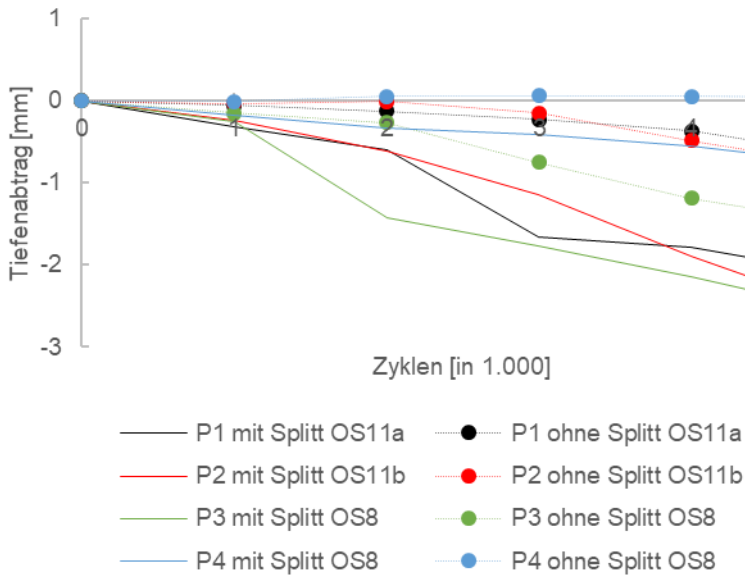


Abb. 6.24: Maximaler Tiefenabtrag im Vergleich Beanspruchung mit / ohne Splitt

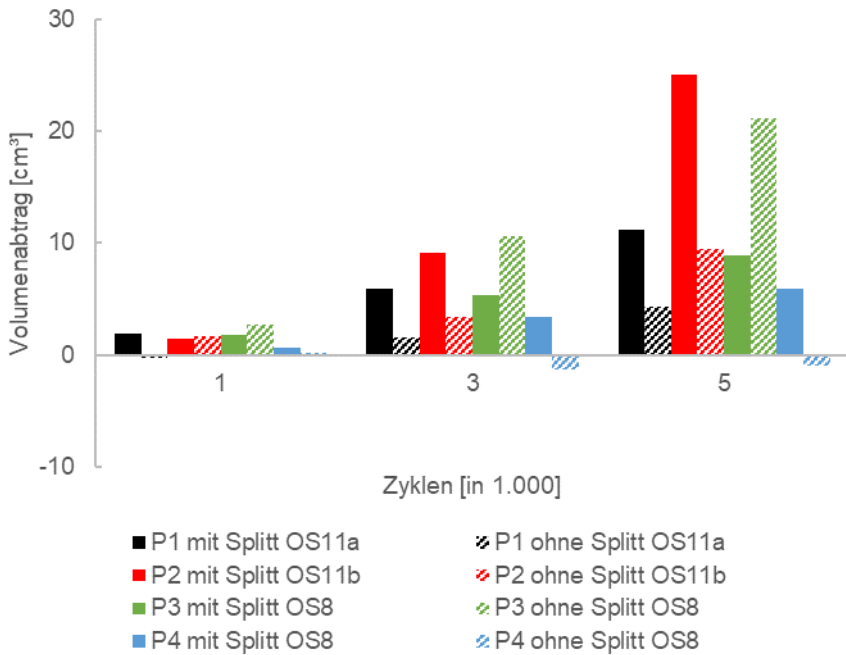


Abb. 6.25: Volumenabtrag im Vergleich Beanspruchung mit / ohne Splitt

Tab. 6.19: Schichtdicken und Abtragstiefen mit / ohne Splitt-Beanspruchung nach 5.000 Zyklen

Schichtdicken und Abtragstiefen			
Schichtdicke bei 0 Z	Restschichtdicke bei 5.000 Z	Maximale Abtragstiefe $A_{BK}$	Maximale Abtragstiefe $A_L$
P1 (OS 11a)			
ohne Splitt			
5,0 mm	4,5 mm	0,5 mm (10 %)	0,59 mm (12 %)
mit Splitt			
5,0 mm	3,0 mm	2,0 mm (40 %)	2,08 mm (42 %)
P2 (OS 11b)			
ohne Splitt			
4,5 mm	4,0 mm	0,5 mm (11 %)	0,87 mm (19 %)
mit Splitt			
4,5 mm	2,5 mm	2,0 mm (44 %)	2,23 mm (50 %)
P3 (OS 8)			
ohne Splitt			
4,0 mm	3,0 mm	1,0 mm (25 %)	1,60 mm (40 %)
mit Splitt			
4,0 mm	1,6 mm	2,4 mm (60 %)	2,34 mm (59 %)
P4 (OS 8)			
ohne Splitt			
1,6 mm	1,6 mm	0,0 mm (0 %)	0,02 mm (1,4 %)
mit Splitt			
1,6 mm	0,9 mm	0,7 mm (44 %)	0,76 mm (48 %)
$A_{BK}$ : Maximale Abtragstiefe gemessen an einer Bohrkernprobe			
$A_L$ : Maximale Abtragstiefe durch Lasermessung			

Tab. 6.20: Verschleißkategorie mit / ohne Splitt-Beanspruchung nach 5.000 Zyklen

Probekörper	Verschleißkategorie	
	ohne Splitt	mit Splitt
P1 (OS 11a)	VK 2	VK 4
P2 (OS 11b)	VK 2	VK 4
P3 (OS 8)	VK 4	VK 5
P4 (OS 8)	VK 1	VK 3

### 6.8.3 Schlussfolgerung

Erwartungsgemäß führte die Verschleißuntersuchung mit Splittzugabe zu einem bis zu 50 % höheren Verschleiß. Bereits nach wenigen Zyklen konnte Materialabtrag beobachtet werden. Vor allem in Wintermonaten, wenn durch das Streuen von Splitt, mehr Verunreinigungen in den Parkbau eingetragen werden, darf die Reinigung nicht vernachlässigt werden, da ansonsten innerhalb kürzester Zeit ein erheblicher Schaden an den vergleichsweise weichen Polymeren entstehen kann. Überraschend war auch



der verhältnismäßig starke Verschleiß an den beiden starren Systemen. Eine Begründung hierfür kann sein, dass diese im Vergleich zu den elastischen Systemen keine Verformungen aufnehmen und es zu einem direkten Versagen führt. Lokal stärker auftretender Verschleiß begünstigt das schnelle Voranschreitens des Materialabtrags zusätzlich, da aus den gebildeten Vertiefungen der Splitt bei der Radrotation weniger nach außen transportiert wird.

Tab. 6.21: Abtragstiefen und Volumenabtrag mit / ohne Splitt in Abhängigkeit der Zyklusanzahl

		Zyklusanzahl				
		1.000	2.000	3.000	4.000	5.000
Max. Abtragstiefe $A_L$ [mm]	P1 ohne Splitt	-0,06	-0,13	-0,23	-0,37	-0,66
	P1 mit Splitt	-0,32	-0,60	-1,66	-1,78	-2,11
	P2 ohne Splitt	-0,03	-0,01	-0,15	-0,49	-0,79
	P2 mit Splitt	-0,24	-0,61	-1,14	-1,89	-2,54
	P3 ohne Splitt	-0,15	-0,27	-0,75	-1,19	-1,49
	P3 mit Splitt	-0,26	-1,43	-1,76	-2,14	-2,56
	P4 ohne Splitt	-0,01	0,05	0,06	0,06	0,05
	P4 mit Splitt	-0,18	-0,33	-0,40	-0,56	-0,77
Volumenabtrag [cm³]	P1 ohne Splitt	-0,24	0,62	1,60	2,96	4,35
	P1 mit Splitt	1,90	3,26	5,96	8,80	11,18
	P2 ohne Splitt	1,64	2,07	3,43	6,42	9,45
	P2 mit Splitt	1,42	4,35	9,08	16,50	25,13
	P3 ohne Splitt	2,66	6,07	10,59	16,31	21,17
	P3 mit Splitt	1,84	3,50	5,38	7,29	8,87
	P4 ohne Splitt	0,15	-1,04	-1,32	-1,18	-0,95
	P4 mit Splitt	0,64	3,04	3,44	4,19	5,98
Volumenabtrag/ Radaufstands- fläche [mm]	P1 ohne Splitt	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
	P1 mit Splitt	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05
	P2 ohne Splitt	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
	P2 mit Splitt	0,01	0,02	0,04	0,07	0,11
	P3 ohne Splitt	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
	P3 mit Splitt	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
	P4 ohne Splitt	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00
	P4 mit Splitt	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03

## **6.9 Shore-Härte nach DIN EN ISO 868**

### **6.9.1 Allgemeines**

Mit der Shore-Härte nach [DIN EN ISO 868] kann ein weiterer Werkstoffparameter an Elastomeren ermittelt werden. Dieses Verfahren wird an freien Produktfilmen ohne die Einstreuung von Quarzsand durchgeführt. Bei der Prüfung dringt ein federbelasteter Stift in die Oberfläche ein. Die Klassifikation ergibt sich aus dem Widerstand des Kunststoffs gegen das Eindringen des Stifts. Temperaturbedingte Einflüsse auf die Festigkeiten lassen sich daher an diesen Proben relativ einfach durchführen. Die Bestimmung der Shore-Härte ist ein Prüfverfahren, das seinen Ursprung in der Fahrzeugtechnik hat. Mit Hilfe dieses Verfahrens erfolgt dort z. B. eine Klassifikation der polymeren Reifengemische hinsichtlich ihres fahrdynamischen Verhaltens auf der Fahrbahnoberfläche. Der Reifenverschleiß und die Haftung kann hiermit bewertet werden.

Die Shore-Härte wird jedoch auch an polymeren Beschichtungen zur Bewertung der Widerstandsfähigkeit gegen starken chemischen Angriff geprüft [DIN EN 1504-2]. Die Prüfung von Elastomeren und thermoplastischen Elastomeren wird nach [DIN ISO 7619-1] durchgeführt. In den Versuchen wurde in Abhängigkeit vom Polymer die Shore-Härte A oder die Shore-Härte D ermittelt. Der wesentliche Unterschied zwischen Shore-Härte A und Shore-Härte D liegt am Eindringstift (bei Shore-Härte A hat der Eindringstift eine flachere Spitze als bei Shore-Härte D) und der Belastung des Stifts (Shore-Härte A: 8.050 mN, Shore-Härte D: 44.500 mN). Die Probe muss einen Minstdurchmesser von 24 mm und eine Materialdicke von 6 mm haben. Die Messung erfolgt an fünf Messstellen mit einem Mindestabstand von 6 mm zueinander, aus denen anschließend der Mittelwert ermittelt wird. Die Prüfzeit von vulkanisierten Elastomeren liegt bei drei Sekunden und bei thermoplastischen Elastomeren bei 15 Sekunden.

Die Messwerte von Shore-Härte A und Shore-Härte D korrelieren. In den Grenzbereichen von 0 und 100 A werden keine realistischen Werte ermittelt, weshalb ab einem Wert von 90 A in [DIN ISO 7619-1] die Durchführung der Shore-Härte D-Prüfung empfohlen wird. Umgekehrt verhält es sich bei Werten, die kleiner 20 D sind. Hier soll die Prüfung der Shore-Härte A erfolgen.

### **6.9.2 Durchführung**

Die Shore-Härte wurde an einem rissüberbrückenden OS 11a-System (Polyurethan und Epoxidharz) und einem OS 10-System (Polymethylmethacrylat) bei unterschiedlichen Prüftemperaturen untersucht [Heene - 2014]. Es wurde dabei jede einzelne Schicht des Beschichtungssystems ohne Abstreuerung separat betrachtet. In Abhängigkeit von den Mindest- und Maximaltemperaturen sowie der Zeitabhängigkeit wurden für drei Prüftemperaturen von jedem System je zwei Probekörper hergestellt. In Summe wurden von jedem System 24 Proben hergestellt (Tab. 6.22).

Für die Prüfung wurden die Proben aus dem Lagerungsklima entnommen, sodass diese bei 20 °C an fünf Messstellen mit jeweils drei und 15 Sekunden erfolgte. Für die Prüfung wurde je Probekörper circa eine Minute benötigt. Durch die kurzzeitige

Entnahme der Proben für nur eine Minute aus dem Lagerungsklima sollte eine Nachreaktion bzw. Reaktionsverzögerung ausgeschlossen werden. Die Prüfung wurde mit Approximation der Shore-Härte an einen Endwert abgebrochen.

Tab. 6.22: Gegenüberstellung der Probekörper zur Bestimmung Shore-Härte an OS 11a- und OS 10-Einzelkomponenten

	OS 11a	OS 10
Polymerart	PUR / EP	PMMA
Geprüfte Schichten	Grundierung (EP), Schwimmschicht (PUR), Verschleißschicht (PUR), Deckversiegelung (PUR)	Grundierung (PMMA), Schwimmschicht (PMMA), Verschleißschicht (PMMA), Deckversiegelung (PMMA)
Mindest- / Maximal- aushärtetemperatur	10 °C / 30 °C	0 °C / 35 °C
Prüftemperaturen	10 °C / 20 °C / 30 °C	0 °C / 20 °C / 35 °C
Lagerungsort	10 °C: Klimaschrank 20 °C: Klimaraum 30 °C: Klimaschrank	0 °C: Klimaschrank 20 °C: Klimaraum 35 °C: Klimaschrank

Von den Proben die bei 20 °C gelagert wurden, wurde nach einer Konditionierung (OS11a: nach 2 Monaten, OS 10: nach 20 Tagen) in diesem Klima jeweils eine bei -20 °C und eine bei 50 °C (Klimaschrank) gelagert. Extreme Temperaturen wie sie im Winter oder Hochsommer erreicht werden können, sollen damit simuliert und die Materialermüdung durch Temperaturzyklen geprüft werden. Dafür erfolgte die Konditionierung und Prüfung je Extremtemperatur über fünf Zyklen à 1,5 Stunden. Nach 1,5 Stunden erfolgte die Lagerung bei 20 °C. Die Shore-Härte wurde alle 30 Minuten ermittelt.

### 6.9.3 Ergebnisse

Die Auswertung erfolgte zunächst für die einzelnen Komponenten separat. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, ist z. T. eine Umrechnung nach [Tobisch - 1981] von Shore-Härte A auf Shore-Härte D notwendig. Die gemessenen Shore-Härten A wurden anschließend daher auf Shore-Härte D umgerechnet, sodass alle Ergebnisse als Shore-Härte D aufgeführt werden. Die Shore-Härte wurde sowohl nach drei als auch nach 15 Sekunden bestimmt. Es konnte kein signifikanter Unterschied in den Shore-Härten in Abhängigkeit von der Prüfzeit festgestellt werden. Bei den Ergebnissen der Shore-Härte für das OS 10-System (Polymethylmethacrylat) ist zu beachten, dass die Aushärtetemperatur und der Verlauf der Aushärtung über die Menge des zugesetzten Härters gesteuert wurde.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der einzelnen Schichten und der Gesamtsysteme dargestellt (Abb. 6.26 bis Abb. 6.31). Es zeigte sich, dass die Aushärtetemperatur einen Einfluss auf die Endfestigkeiten hat. Niedrigere Aushärtetemperaturen führten bei den Epoxidharzen und Polyurethanen zu niedrigeren Festigkeiten. Die Polymethylmethacrylate verhielten sich dagegen entgegengesetzt, bei niedrigeren Aushärtetemperaturen wurden höhere Festigkeiten erreicht. Es ist davon auszugehen, dass die mittlere Polymerkette bei niedrigeren Temperaturen länger und die Steifigkeit

bzw. Festigkeit dadurch höher ist. Polymethylmethacrylate wiesen bereits nach kurzer Aushärtezeit (< 20 Stunden) ihre Endfestigkeit auf, bei den Polyurethanen und Epoxidharzen wurden dafür über 80 Stunden benötigt.

Deutlich zu erkennen sind auch die Shore-Härte-Unterschiede der einzelnen Schichten. Epoxidharze verfügten über höhere Festigkeiten als Polymethylmethacrylate bei den Grundierungen. Bei der Schwimm- und Verschleißschicht erreichten die Polymethylmethacrylate dagegen höhere Festigkeiten als die Polyurethane. Bei der Deckversiegelung waren die Festigkeiten abhängig von der Aushärtetemperatur bzw. Härterzugabe. Die rissüberbrückenden Schichten (Schwimm- und Verschleißschicht) verfügten erwartungsgemäß aufgrund ihrer Funktion über deutlich niedrigere Festigkeiten als die Grundierung und Deckversiegelung. Die Grundierung verfügte immer über die höchste Festigkeit und stellt den Verbund zum Betonuntergrund her.

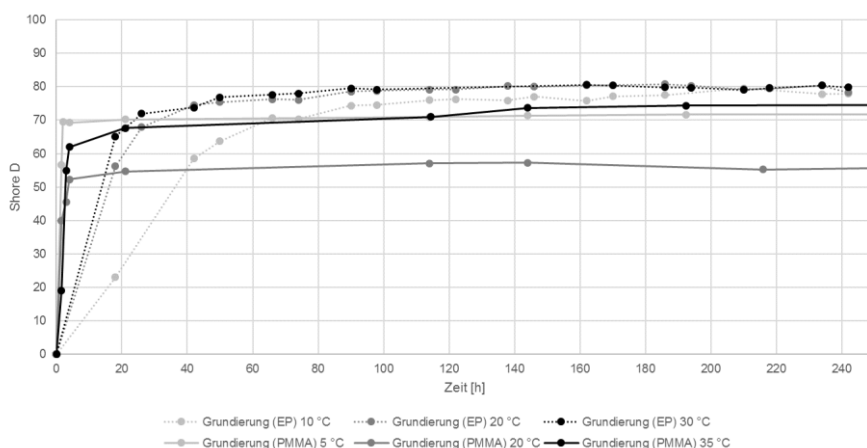


Abb. 6.26: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Grundierungen aus EP und PMMA

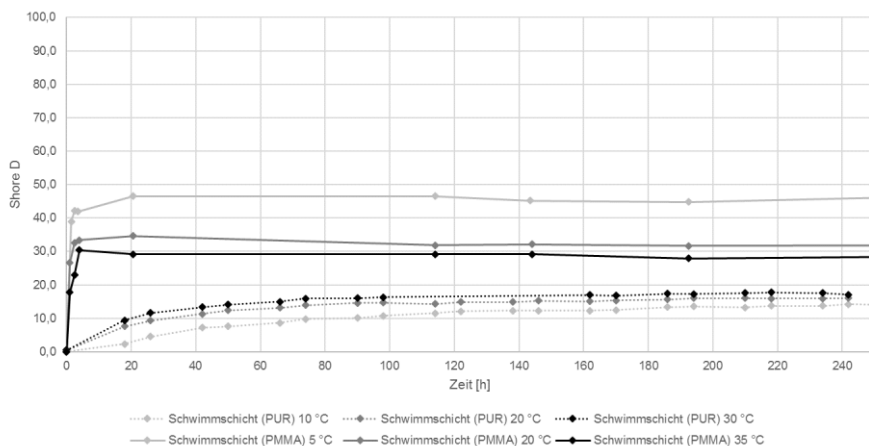


Abb. 6.27: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Schwimmschichten aus EP und PMMA

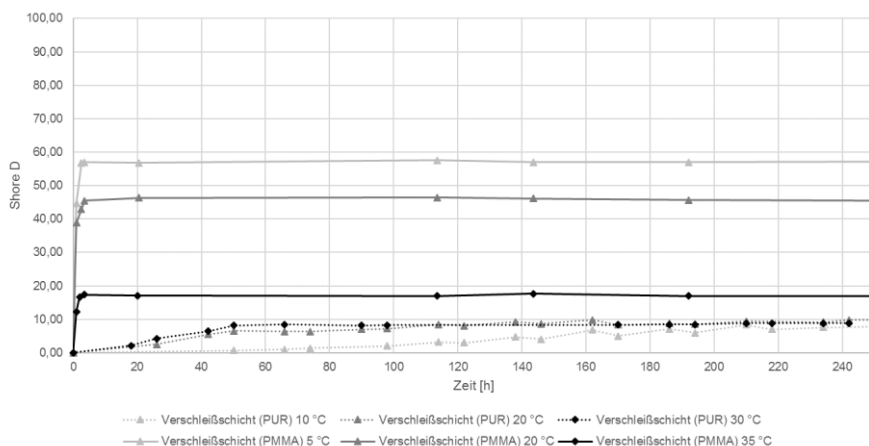


Abb. 6.28: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Verschleißschichten aus PUR und PMMA

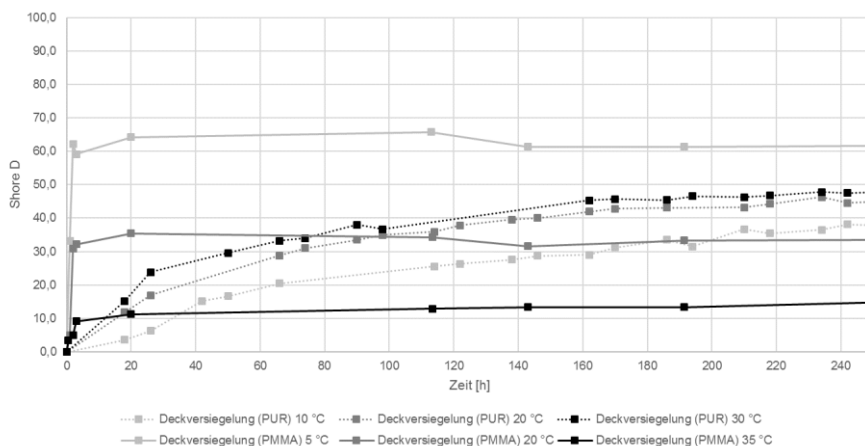


Abb. 6.29: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Deckversiegelungen aus PUR und PMMA

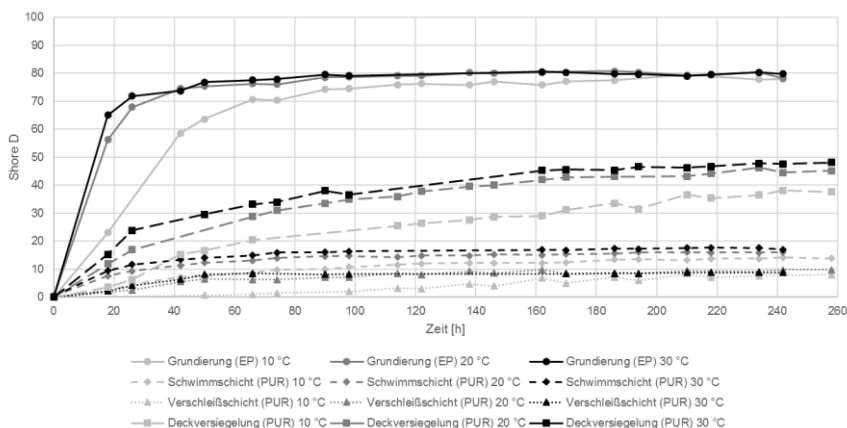


Abb. 6.30: Abhängigkeit der Shore-Härte D (3 Sekunden Prüfzeit) von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 11a-System

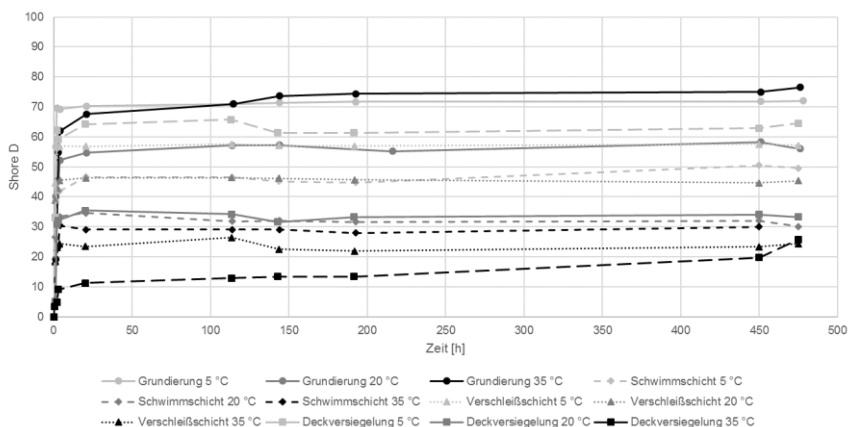


Abb. 6.31: Abhängigkeit der Shore-Härte D (3 Sekunden Prüfzeit) von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 10-System

Neben der Ermittlung der Shore-Härten-Entwicklung bei verschiedenen Aushärtetemperaturen wurde eine Temperaturwechselbeanspruchung bei Sommer- und Winterbedingungen im Versuch simuliert. Hierfür wurden die ausgehärteten Proben bei verschiedenen Temperaturbereichen abwechselnd konditioniert. Die ermittelten Shore-Härten der Einzelschichten sind jeweils in einem Diagramm als System dargestellt. Zur Simulation der Winterbedingungen wurden die Proben im Wechsel zwischen 20 °C und -20 °C gelagert (Abb. 6.32). Für die Sommer Temperaturen wurden die Proben bei Temperaturen von 20 °C und 50 °C im Wechsel konditioniert (Abb. 6.33). Die gewählten Temperaturzyklen mit einer Temperaturspanne von 30 K werden in den Sommermonaten mit einer maximalen Temperatur von 50 °C auf einem Freideck oftmals erreicht.

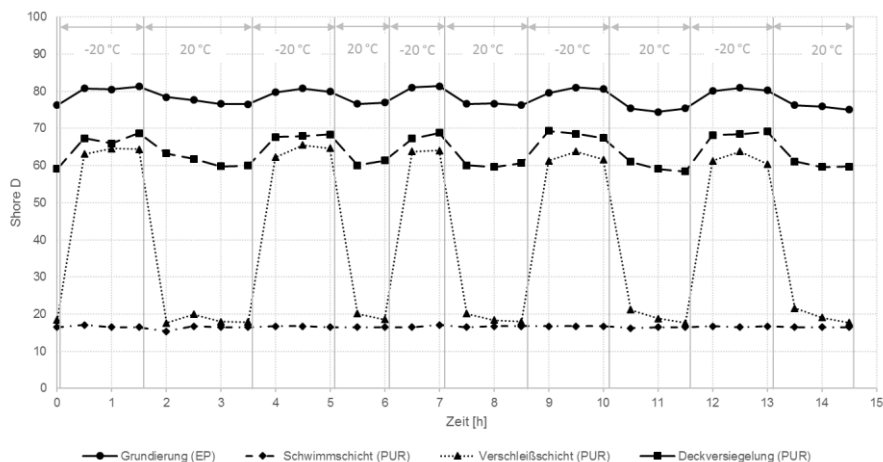


Abb. 6.32: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / -20 °C (Simulation Winterzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 11a-System

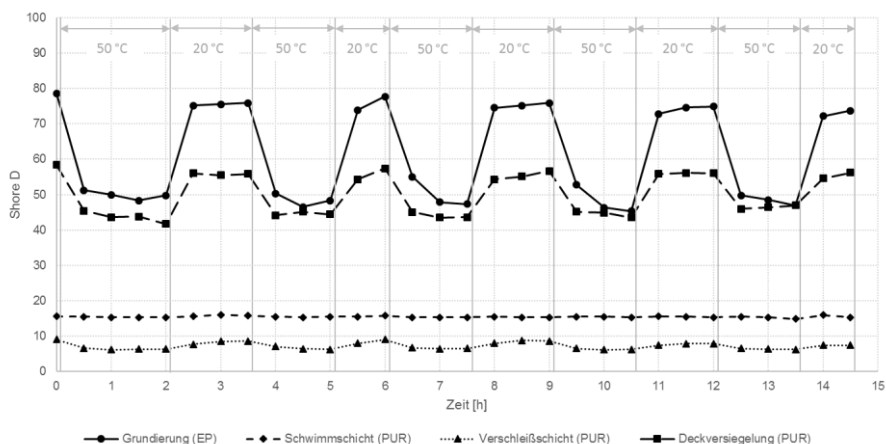


Abb. 6.33: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / 50 °C (Simulation Sommerzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 11a-System

Erwartungsgemäß weisen die elastischen Schichten (Schwimm- und Verschleißschicht) niedrigere Shore-Härten auf. Die Wintertemperaturen machen sich im Wesentlichen nur bei der Härte der OS 11a-Verschleißschicht bemerkbar, mit einer Erweichung bei höheren Temperaturen reagieren die Grundierung und die Deckversiegelung. Die Zunahme der Härte bei tiefen Temperaturen ist bezüglich der Verschleißbeständigkeit positiv zu bewerten. Kritisch zu erachten ist dagegen die Abnahme der Härte der Deckversiegelung bei hohen Temperaturen. Das System wird durch die höheren Temperaturen weicher, die Verschleißbeständigkeit nimmt ab.

Betrachtet man dagegen die Temperaturzyklen des OS 10-Systems aus Polymethylmethacrylat dann wird deutlich, dass dieses System, unabhängig von der Schichtart, auf Temperatureinflüsse reagiert. Niedrige Temperaturen führen zu einem deutlichen Anstieg der Shore-Härte und hohe Temperaturen wirken gegensätzlich (Abb. 6.34 und Abb. 6.35). Deutlich wird ebenfalls, dass die ursprünglichen Shore-Härten bei 20 °C immer wieder erreicht werden. Es finden offensichtlich keine irreversiblen Veränderungen der Polymethylmethacrylate statt. Analog zu den Temperaturzyklen sind auch hier wie beim OS 11a-System die hohen Temperaturen und damit die Erweichung des Kunststoffs bzgl. der Verschleißbeständigkeit als kritisch zu bewerten.



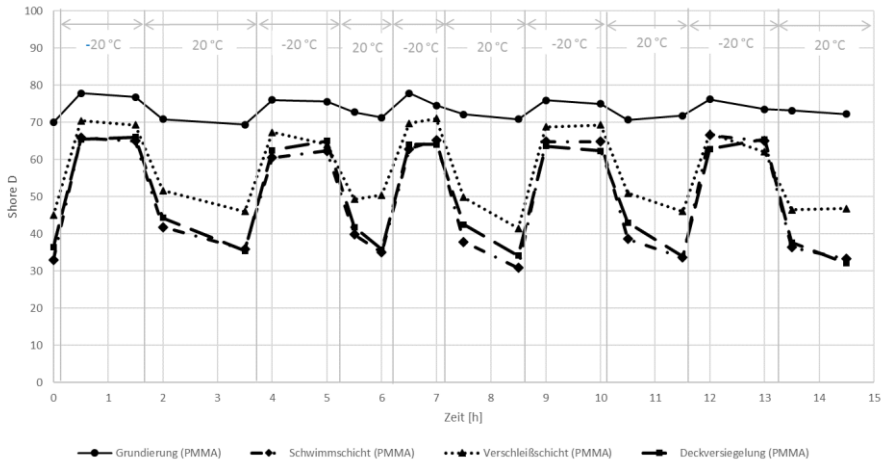


Abb. 6.34: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / -20 °C (Simulation Winterzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 10-System

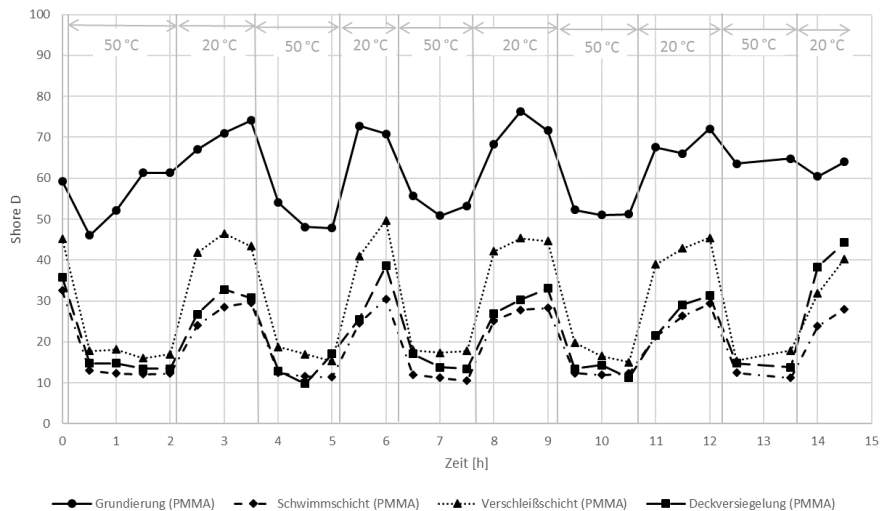


Abb. 6.35: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / 50 °C (Simulation Sommerzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 10-System

#### 6.9.4 Schlussfolgerung

Die Härtingsreaktionen verlaufen bei OS 11a-Systemen und OS 10-Systemen prinzipiell unterschiedlich. Die Polymethylmethacrylate härten deutlich schneller aus als Polyurethane oder Epoxidharze. Dies ist vor allem bei der Erstbelastung von Bedeutung und entsprechend zu berücksichtigen. Weiterhin ermöglicht dies schnellere Abläufe bei Sanierungen. Die höheren Shore-Härte-Werte wiesen erwartungsgemäß die Grundierungen und Deckversiegelungen

auf. Da die Grundierungen keine rissüberbrückenden Eigenschaften aufweisen müssen und die Haftung zwischen Untergrund und Beschichtungssystem gewährleisten sollen, müssen diese Schichten höhere Shore-Härten aufweisen als die nachfolgenden Schichten. Die Schwimm- und Verschleißschicht sind die rissüberbrückenden Schichten. Um eine Rissüberbrückbarkeit gewährleisten zu können, ist eine Elastizität des Systems notwendig, die mit niedrigeren Shore-Härten einhergeht. Die Deckversiegelung muss dagegen wieder entsprechend robust gegenüber Verschleiß sein und verfügt somit über höhere Shore-Härten. Diese Schicht kann daher nicht die gleiche Elastizität wie die darunterliegenden aufweisen. Dies erklärt auch warum die Deckversiegelung häufig über Anrisse verfügt, welche geplant waren in der DAfStb-Instandhaltungsrichtlinie [DAfStb - 2016] ausdrücklich zu zulassen. In der Technischen Regel des DIBt, welche inhaltlich weitestgehend auf der Instandsetzungsrichtlinie [DAfStb - 2001] basiert, sind dagegen weder Durchrisse noch oberseitige Anrisse zulässig.

Bei den geprüften Materialien haben die Aushärtetemperaturen einen signifikanten Einfluss auf die Endfestigkeiten. Diesen Sachverhalt gilt es bei der Applikation sowie bei der Prüfung der Verschleißbeständigkeit von Beschichtungen zu berücksichtigen, da dies einen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit haben kann. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Materialien auf Temperaturveränderungen nach der Aushärtung unterschiedlich reagieren. Während es bei einem Teil zu einer Erhärtung / Erweichung führt, gibt es auch Produkte, bei denen Temperaturänderungen keinen Einfluss auf die Shore-Härte haben. Eine Erweichung bei hohen Temperaturen kann prinzipiell den Verschleiß beschleunigen.

Auffällig ist zudem, dass beim PMMA-System alle Schichten relativ gleichmäßig auf die Temperaturveränderungen reagieren und in gleichem Verhältnis die Shore-Härten zu- bzw. abnehmen. Eine gleichmäßige Zu- und Abnahme der Festigkeiten führt zu einer homogenen Steifigkeit und geringeren inneren Spannungen des Systems und kann eine Begründung für den in der Praxis geringeren Verschleiß an diesen Systemen sein. Dahingegen führen tiefere Temperaturen beim OS 11a-System zu höheren Shore-Härten bei der Verschleißschicht und höhere Umgebungstemperaturen bei der Grundierung und Deckversiegelung zu einer Erweichung des Systems. Dies kann einen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit haben. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Nachweis der Verschleißbeständigkeit von Parkhausbeschichtungssystemen unter realitätsnahen Prüfbedingungen“ [Breit et al. - 2015a] wurde an einem Probekörper (OS 13-System bzw. P 7 aus Vergleich BCA- / PAT-Verfahren) die Oberfläche mittels UV-Lampe lokal während des Versuchs erhitzt. Hierbei zeigte sich jedoch kein stärkerer Verschleiß, welcher rückwirkend betrachtet an einem elastischen System wiederholt werden sollte. Weiterhin ist zu beachten, dass die Shore-Härten rein an dem Kunststoff und nicht am Kunststoff-Quarzsand-Gemisch erfolgen. Verschleiß ist jedoch eine Systemeigenschaft und nicht allein von der Oberflächenhärte des Polymers ableitbar. Ein direkter Rückschluss auf die Verschleißbeständigkeit der einzelnen Systeme ist daher nicht möglich.

In Abhängigkeit von der Kettenstruktur und -länge können bereits Temperaturen ab 50 °C zur Erweichung des Polymers führen und damit Verschleiß begünstigen. Eine

Kombinationsprüfung aus Ermittlung der Shore-Härten bei 50 °C und einer Untersuchung der Verschleißbeständigkeit bei diesen Temperaturen mit dem Parking Abrasion Test kann als sinnvoll erachtet werden, wenn die Shore-Härten sich um mehr als 20 % zum Normalklima (23 °C) unterscheiden, da dies ein Indiz für eine geringere Verschleißbeständigkeit sein kann. [Breit et al. - 2015a]

## **6.10 Bestimmung der Haftzugfestigkeit vor und nach der Beanspruchung**

### **6.10.1 Allgemeines**

Anlass der Bestimmung der Haftzugfestigkeiten war die Fragestellung, ob die Materialeigenschaften sich durch die Beanspruchung verändern. Schichtdickenabträge können an Bohrkernproben nachgewiesen werden, eine Kompression o. ä. wird daran jedoch unter dem Lichtmikroskop nicht sichtbar. Shore-Härten und Zugmodule können ebenfalls an beschichteten Probekörpern nicht mehr ermittelt werden ohne dass der Untergrund einen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen würde. Es wurde daher auf ein Prüfverfahren zurückgegriffen, das in der Praxis regelmäßig und bereits für die Applikation von Oberflächenschutzsystemen angewendet wird.

### **6.10.2 Durchführung**

Neben den Oberflächenzugfestigkeiten des nicht beschichteten Probekörpers wurden an zwölf Probekörpern / Oberflächenschutzsystemen die Haftzugfestigkeiten nach [DIN EN 1542] ermittelt. Die Haftzugfestigkeiten wurden mit Ringnut sowohl im unbelasteten als auch belasteten Bereich nach Beendigung der Versuche bestimmt, sodass ein gleiches Probenalter bei der Prüfung vorlag.

### **6.10.3 Ergebnisse**

Die Mittelwerte aus einer Serie von jeweils drei Haftzugfestigkeiten je System sind in Tab. 6.23 zusammengefasst. OS 8-Systeme wiesen aufgrund des starren Systemaufbaus höhere Festigkeiten auf. Weiterhin auffällig ist hier, dass der Bruch sowohl bei diesen als auch bei den ähnlich steifen OS 13-Systemen nicht im Beschichtungssystem, sondern im Beton stattfand. Bei den elastischen Systemen fand dagegen der Bruch im Oberflächenschutzsystem bzw. im Übergang zum Betonuntergrund statt. Des Weiteren ist klar ersichtlich, dass die unbelasteten Bereiche über niedrigere Haftzugfestigkeiten verfügen als die belasteten. Durch die Belastung muss eine Nachverfestigung der Bereiche stattgefunden haben.

Tab. 6.23: Haftzugfestigkeiten und Versagensarten nach [DIN EN 1542] an belasteten und unbelasteten Bereichen mit dem Parking Abrasion Test

System	Haftzugfestigkeit		Versagensart	
	belastet	unbelastet	belastet	unbelastet
OS 8 (1)	4,37	4,01	100 % A	100 % A
OS 8 (2)	4,25	4,03	100 % A	100 % A
OS 8 (3)	4,01	3,91	100 % A	100 % A
OS 8 (4)	4,95	4,74	100 % A	100 % A
OS 11a (1)	0,91	0,77	100 % C	100 % C
OS 11a (2)	1,40	1,24	100 % C	100 % C
OS 11a (3)	0,96	0,76	100 % C	100 % C
OS 11a (4)	1,11	0,75	100 % C	100 % C
OS 11a (5)	1,15	1,46	100 % C	100 % C
OS 11b (1)	2,35	2,04	100 % C	20 % B, 80 % C
OS 11b (2)	2,17	2,40	5 % B, 95 % C	100 % C
OS 11b (3)	2,53	1,97	80 % B, 20 % C	5 % B, 95 % C
OS 11b (4)	2,53	2,31	90 % B, 10 % C	65 % B, 35 % C
OS 10	0,73	1,16	100 % C	100 % C
OS 13 (1)	2,36	1,97	100 % A	100 % A
OS 13 (2)	2,64	2,43	100 % A	100 % A
A: Kohäsionsbruch im Beton B: Bruch zwischen Klebstoff und Abzugskörper C: Bruch innerhalb des Beschichtungssystem				

#### 6.10.4 Schlussfolgerung

Die Belastung durch das PKW-Rad scheint eine „Verfestigung“ bzw. Kompression im Beschichtungssystem hervorzurufen. Thermoplaste (Polyurethane und Polymethylmethacrylate) sind plastisch verformbar bei Erwärmung. Diese entsteht lokal bei einer Verschleißbeanspruchung. Alle anderen Kunststoffe nehmen nach der Entlastung wieder ihre Ausgangsform an. Bei einer Kompression des Kunststoffs werden sich die einzelnen Polymerketten, die unvernetzt sowie linear bis verzweigt vorliegen können, durch die Erwärmung verformen und in komprimierter Form wieder verfestigen. Es ist davon auszugehen, dass die Polymerketten sich dabei ineinander „verhaken“. Dies lässt den Rückschluss zu, dass verfestigte Oberflächenschutzsysteme zu einer Reduktion des Verschleißes neigen. Nach Erreichen des Einlaufverschleißes trägt die Kompression dazu bei den Verschleiß zu reduzieren.

## 7 Schlussfolgerung

### 7.1 Schlussfolgerungen für die Prüfungen von Oberflächenschutzsystemen mit dem Parking Abrasion Test

Die normativen Prüfverfahren für Oberflächenschutzsysteme spiegeln die Anforderungen und Beanspruchungen aus der Praxis nicht korrekt wider. Dies zeigen zum einen die Erfahrungen aus der Praxis als auch die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche mit dem BCA-Verfahren. Mit dem Parking Abrasion Test ist eine realitätsnahe Bewertung von Oberflächenschutzsystemen möglich. Ebenfalls ist es möglich, die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Oberflächenschutzsystemen mit diesem Verfahren zu bewerten. Erwartungsgemäß erwiesen sich die starren Oberflächenschutzsysteme deutlich verschleißbeständiger als die rissüberbrückenden, elastischen Alternativen. Der in der Praxis vorliegende Zwiespalt hinsichtlich der Bewertung der Verschleißbeständigkeit wird mit diesem Prüfverfahren deutlich sichtbar, was bei Verwendung des normativen BCA-Verfahrens nicht erkannt werden kann. Weiterhin treten beim Parking Abrasion Test die unterschiedlichen Arten der Verschleißentstehung, punktuell, weiter ausbreitender und flächiger Abtrag, deutlich hervor. Erstgenannter entsteht oftmals, wenn die Deckversiegelung sehr hohe Festigkeiten aufweist, letztgenannter kontinuierlich über die Verschleißzyklen. Überdies wird erkennbar, ob das tribologische System sich zunächst „einlaufen“ muss und damit zunächst höhere Abtragsraten zu erwarten sind.

Der Parking Abrasion Test bietet zudem die Möglichkeit, die Systeme und einzelne Produkte hinsichtlich ihrer Verschleißbeständigkeit bei gleichen Prüfkonditionen zu prüfen und zu bewerten. Ebenfalls können die Systeme bei Bedarf zusätzlichen Beanspruchungen wie einer Wasser- oder Splittbeaufschlagung ausgesetzt werden, sodass produktspezifische Eigenschaften überprüft werden können. Mit jeder Rotation wirken auf das System Brems- und Anfahrkräfte, sodass bei einer Überfahung nicht nur die (im Wesentlichen einwirkenden) Normalkräfte resultieren. Die Beschichtungssysteme sind daher sehr hohen Beanspruchungen ausgesetzt.

Für die Verschleißdokumentation wurden verschiedene Möglichkeiten erprobt. Die Verschleißdokumentation sowohl mit Fotos als auch mit Hilfe von Laser- oder einer magnetisch-induktiven Schichtdickenmessung hat sich bewährt, da hierdurch eine lückenlose Verschleißdokumentation gewährleistet werden kann. Deutlich sichtbar wurde dies an Systemen, bei denen der Verschleiß anfänglich stärker ausgeprägt ist. Weiterhin konnte an Systemen, bei denen der Verschleiß erst relativ spät einsetzte, beobachtet werden, dass dieser rapide zunahm. Dieses Verhalten kann dann festgestellt werden, wenn das System „im Inneren“ versagt. Ein Vergleich der gemessenen Verschleißtiefen zwischen Feinschnitten an Bohrkernproben und Lasermessung führte zu übereinstimmenden Ergebnissen. Ein Unterschied von bis zu 0,5 mm ist vertretbar, da dies bereits durch ein herausgebrochenes Quarzsandkorn verursacht werden kann. Die magnetisch-induktive Schichtdickenmessung führt bei geübter Handhabung, wie auch die Dokumentation mit dem Laser, zu vergleichbaren Ergebnissen. Von Nachteil ist jedoch der deutlich größere Aufwand, da vor der Applikation des Oberflächenschutzsystems ein Metallstreifen eingebaut werden muss. In der Praxis ist daher die Laser-Dokumentation vorzuziehen.

Die Klassifizierung der verschiedenen Oberflächenschutzsysteme mithilfe des PAT-Verfahrens in Bezug auf die dokumentierte Verschleißstärke nach 15.000 Zyklen ist ein sinnvolles Vorgehen hinsichtlich der Bewertung einer realitätsnahen Bewertung des Verschleißes. Für hochbeanspruchte Bauwerke sollten anhand der Versuchsergebnisse nur Systeme Verwendung finden, die in Verschleißklasse 1 oder 2 eingestuft wurden. Systeme, die in Verschleißklasse 3 eingruppiert wurden, können in wenig beanspruchten Parkbauten eingesetzt werden. Die Systeme, die nach 15.000 Zyklen der Verschleißklasse 4 zuzuordnen sind, sind als kritisch anzusehen und weniger geeignet. Dies trifft vor allem auf die Systeme zu, bei denen bereits frühzeitig kontinuierlicher Verschleiß eintrat. Eine kritische Betrachtung ist vor allem dann sinnvoll, wenn ein solches System nur mit den Mindestschichtdicken und ohne eine sogenannte Opferschicht erfolgte.

In weiteren Versuchen wurde der Einfluss unterschiedlicher Reifengeometrien hinsichtlich der Temperaturentwicklung und dem daraus resultierenden Einfluss auf das Verschleißverhalten an Oberflächenschutzsystemen untersucht. Hier zeigte sich, dass aus der Reifengröße kein direkter Zusammenhang zur Aufstandsfläche ableitbar ist, da diese maßgeblich vom Profil beeinflusst wird. Die Reifenmischungen haben einen erheblichen Einfluss auf die durch Reibung entstehende Oberflächentemperatur. Trotz unterschiedlicher Profile und Reifenmischungen lag bei fast allem Reifen die Oberflächentemperatur auf dem Oberflächenschutzsystem bei maximal 50 °C. Bei Verwendung neuer Reifen sollte daher die zu erwartende Erwärmung überprüft werden. So kann sichergestellt werden, dass die Glasübergangstemperatur der Beschichtungen nicht überschritten wird. Zu empfehlen ist weiterhin, dass der Reifen nicht permanent an derselben Stelle belastet wird, sondern mit Beginn eines neuen Prüfintervalls an einer anderen Stelle belastet wird. Aufgrund der permanenten Weiterentwicklung und Optimierung der PKW-Reifen, ist es nicht möglich neben der Reifengeometrie weitere Parameter festzulegen. Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Reifen konnten zudem belegen, dass die Reifensorte eine untergeordnete Rolle bzgl. der Oberflächentemperatur resultierend aus der Reibung und somit des Verschleißverhaltens spielt.

Aus den ermittelten Materialkennwerten ist ableitbar, dass die Umgebungstemperatur und die Feuchten einen Einfluss auf die Festigkeiten und damit auf Verschleißbeständigkeiten haben und diese maßgeblich beeinflussen können. Hierbei handelt es sich jedoch um ein komplexes Zusammenspiel von den Materialeigenschaften der Einzelkomponenten, der Größe und Einbindung des Abstreukorns, der Schichtdicke (v. a. bei der Deckversiegelung) und auch den klimatischen Umgebungsbedingungen. Diese Kennwerte bzw. das Zusammenspiel der verschiedenen Parameter bleiben bei der Ermittlung weitestgehend unberücksichtigt. Für eine praxisgerechte Prüfung des Verschleißes am gesamten Oberflächenschutzsystem ist daher die Etablierung dieses realitätsnahen Prüfverfahrens und Verankerung in Regelwerken anzustreben. So können Erfahrungen aus der Baupraxis durch das PAT-Verfahren im Labor simuliert bzw. überprüft werden. Als Beispiel ist hier die Verwendung eines gröberen Einstreukorns zu nennen, das zu einer tieferen Verankerung in der Verschleißschicht und damit zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit beiträgt. Produktspezifische Eigenschaften können so mit dem Parking Abrasion Test abgebildet werden.

## **7.2 Schlussfolgerungen für die Kontrolle und Instandhaltung von Oberflächenschutzsystemen**

Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse in die Praxis hinsichtlich der Langlebigkeit der Beschichtungssysteme gestaltet sich dahingehend schwierig, da weitere Faktoren sie stark beeinflussen können. So hat sich in den Versuchen gezeigt, dass das Betreiberverhalten hinsichtlich der Reinigung einen wesentlichen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit hat. Stehendes Wasser auf den Oberflächenschutzsystemen, das oft im Winter eintragen wird, und Verunreinigungen können die Lebensdauer der Beschichtungen unabhängig vom gewählten System beeinträchtigen. Hinzu kommt das Nutzerverhalten hinsichtlich der Frequentierung der einzelnen Ebenen und ggf. auch von einzelnen Stellplätzen. In engen, stark verwinkelten Parkbauten wird die Beanspruchung der Oberflächenschutzsysteme zusätzlich höher sein, da hier oftmals mit größeren PKWs im Kurvenbereich und an Rampen rangiert werden muss. Hier wirken deutlich häufiger Brems- und Anfahrkräfte auf die Fläche als auf geraden Fahrbahnen. Dementsprechend sind hier verschleißrobustere Systeme zu wählen, die diesen hohen Beanspruchungen widerstehen können. Diese örtlich unterschiedlich stark auftretenden Faktoren beeinflussen die Lebensdauer eines Oberflächenschutzsystems erheblich.

In den Versuchen hat sich weiterhin gezeigt, dass Schäden „plötzlich“ auftreten und ganze Korngruppen nahezu gleichzeitig ausbrechen können, wenn die Systeme „im Inneren“ versagen. Neben der einmal jährlich vorgesehenen Inspektion und ggfs. Wartung, ist es daher sinnvoll die Wartungsintervalle an die Frequentierung anzupassen. Hochfrequentierte Bauwerke benötigen häufigere Wartungsintervalle, um Schäden frühzeitiger zu erkennen und schneller beheben zu können. Dies reduziert die entstehenden Instandsetzungskosten und Ausfallzeiten erheblich. Eine frühzeitige Erneuerung einer verschlissenen Deckversiegelung kann die Nutzungsdauer erhöhen. Es ist daher sinnvoll, das System auf Risse, ausgebrochene Körner und verschlissene Stellen zu untersuchen und diese zu dokumentieren. Ist eine Instandsetzung notwendig, so kann / sollte diese, sofern nicht bereits flächig ein Schaden vorliegt, partiell erfolgen. Dies schadet dem Tragwerk weniger. Bei einer Überarbeitung ist darauf zu achten, dass diese mit dem vorliegenden System übereinstimmt, sodass die Eigenschaften aus der Erst- und Grundprüfung weiterhin gegeben sind. Da gegenwärtig eine Regelungslücke hinsichtlich der Überarbeitbarkeit von Oberflächenschutzsystemen vorliegt, ist zur Wahrung der Gewährleistung dies mit dem Produkthersteller abzustimmen.

Weiterhin gilt es bei den Ergebnissen zu beachten, dass bei der Auswahl des Systems auch der Anwendungsfall zu betrachten ist. Ein weniger verschleißrobustes System kann durchaus für eine Tiefgarage in einem Wohnhaus oder Bürogebäude geeignet sein, bei dem die Frequentierung deutlich niedriger ist als in einem großen Einkaufszentrum oder einem Flughafen. Ebenfalls sollte die Bauart (Einfeldträger mit nahezu keinen Verformungen und damit keinen Rissen oder Mehrfeldträger), das gewählte Entwässerungssystem (Sind Pfützenbildungen zu erwarten? Wird ein Gefälle ausgeführt?) sowie die zu erwartenden Temperaturen (Freideck, Tiefgarage, ...) bei der Wahl des Beschichtungssystems berücksichtigt werden. Während bspw. ein Gefälle die Pfützenbildung deutlich reduziert und damit auch – wie die Versuche bei

Wasserbeaufschlagung zeigten – die Verschleißbeständigkeit des Systems erhöht, kann ein Gefälle in einem Einkaufszentrum zum Rollen von Einkaufswägen oder Rollstühlen führen. Diese Ausführungsmöglichkeiten hat der Planer in Abstimmung mit dem Bauherren abzustimmen. Durchaus üblich ist die Verwendung unterschiedlicher Systeme in den einzelnen Bereichen und Ebenen, welche durch eine einheitliche Deckversiegelung nicht sichtbar werden.

### **7.3 Schlussfolgerungen für die weitere Produktentwicklung**

Die Deckversiegelung bindet das Abstreukorn aus der darunterliegenden Schicht ein und gibt dem System zusätzlich Beständigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Angriffen sowie ggf. UV-Strahlung. Weiterhin verhindert sie den Eintrag von Wasser in die darunterliegenden Schichten. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, muss die Deckversiegelung über eine ausreichende Festigkeit verfügen. Hier hat sich in den Versuchen gezeigt, dass die Deckversiegelung einen erheblichen Einfluss auf die Verschleißgeschwindigkeit hat. Der Verschleiß bzw. Materialabtrag beginnt i. d. R. zeitlich verzögert, verglichen mit einem System ohne Deckversiegelung. Aufgrund der erhöhten Festigkeiten der Deckversiegelung entsteht der Verschleiß allerdings auch nur, wenn die weniger steifen, darunterliegenden Schichten die entstehenden Spannungen durch die Rotation nicht aufnehmen können. Der Verschleiß entsteht optisch plötzlich und somit „im Inneren“ des Systems. Systeme bei denen die Deckversiegelungen geringere Festigkeiten aufweisen oder dünnschichtiger appliziert wurden, verschleifen i. d. R. kontinuierlich durch „herauswackeln“ der Quarzkörner. In der Praxis hat sich gezeigt, dass Systeme, die über eine doppelte Deckversiegelung verfügen, robuster gegenüber Verschleiß sind. Doppelte Versiegelung bedeutet, dass die erste Deckversiegelung abgestreut wird, damit die Rutsicherheit gewährleistet und eine weitere Deckversiegelung anschließend appliziert wird. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht geprüft. Aufgrund der dickeren und damit auch steiferen Deckversiegelung kann davon ausgegangen werden, dass die resultierenden Schubspannungen von der Deckversiegelung besser aufgenommen werden können.

Die unter der Deckversiegelung liegende, hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschicht (hwO, Schwimm- und Verschleißschicht) verfügt über eine oder mehrere der nachfolgend genannten Schutzfunktionen: Diffusionsfähigkeit für  $H_2O$ , Diffusionsdichtigkeit für  $CO_2$ , Temperaturwechselbeständigkeit, Rissüberbrückung und Verschleißfestigkeit. Ist die Verschleißfestigkeit nicht mehr gegeben, erfolgt ein Materialabtrag und somit eine Schichtdickenreduzierung. Am kritischsten ist dies für die Rissüberbrückungsfähigkeit, da ihre Funktionsfähigkeit mit Unterschreiten der Mindestschichtdicke stark abnimmt. Reißt das Oberflächenschutzsystem, so haben  $CO_2$  und chloridhaltige Wässer freien Zutritt bis zum Inneren der ungeschützten Stahlbetonkonstruktion. Die Eigenschaften des Systems aus der Grund- und Erstprüfung können dann nicht mehr eingehalten werden und die anschließenden Instandsetzungskosten werden deutlich erhöht. In diesem Zusammenhang wird auch deutlich, dass der Begriff Verschleißschicht irreführend ist, da diese Schicht zur Gewährung der Funktionalität nicht verschlissen werden darf. Diesem kann nur entgegengewirkt werden, wenn die hwO über eine „Opferschicht“ verfügt, die abgetragen werden darf. Eine zerstörungsfreie Beurteilung, ob der



Verschleiß in der Opferschicht oder Mindestschichtdicke stattfindet, ist nicht möglich. Vor allem bei den elastischen Systemen hat sich gezeigt, dass die Lebensdauer durch eine höhere Schichtdicke der Verschleißschicht verlängert werden kann.

Neben den Verschleißuntersuchungen wurde, als mechanischer Werkstoffkennwert, die Shore-Härte D der Einzelkomponenten (Epoxidharze, Polyurethane und Polymethylmethacrylate) bestimmt. Entsprechend ihrer Funktion im System verfügen die einzelnen Systemkomponenten über unterschiedliche Materialeigenschaften. Rissüberbrückende Schichten eines Oberflächenschutzsystems wiesen niedrigere Festigkeiten gegenüber Grundierungen oder Deckversiegelungen auf. Die untersuchten Polymethylmethacrylate hatten dagegen i. d. R. höhere Festigkeiten, reagierten jedoch stärker auf Temperaturänderungen. Niedrigere Temperaturen führten unabhängig von der Kunststoffart zu höheren Festigkeiten, bei höheren Temperaturen wurden die Kunststoffe weicher.

Mit der Ermittlung der Zugmodule wurde ein weiterer mechanischer Werkstoffkennwert ermittelt. Dies erfolgte sowohl an den Einzelkomponenten als auch an Gesamtsystemen. Der Einfluss des Einstreukorns hinsichtlich der Zugmodule und Zugfestigkeiten konnte nachgewiesen werden. Die Festigkeiten nahmen zu, was erwartungsgemäß mit einer Reduzierung der Dehnung einherging. Sowohl an den Einzelkomponenten als auch am Gesamtsystem konnten die erwarteten Festigkeitsunterschiede ermittelt werden. Eine weitere Verwertung dieser Ergebnisse unter Einbeziehung der Versuche mit dem Parking Abrasion Test ist mit einem Finite Elemente Modell denkbar. Dies stellt jedoch ein eigenes Thema dar und wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Des Weiteren wurden die Haftzugfestigkeiten und Einzelschichtdicken an Bohrkernproben ermittelt. Die niedrigsten Haftzugfestigkeiten wiesen rissüberbrückende OS 11a-Systeme und die höchsten die starren OS 8-Systeme auf. Dies korreliert mit dem Verschleißverhalten. Die Messungen zeigten auch, dass die belasteten Bereiche über höhere Festigkeiten als die unbelasteten verfügen. Bei der Bestimmung der Einzelschichtdicken zeigte sich, dass die Kornspitzen z. T. nur minimal mit der Versiegelung versehen waren. Höhere Schichtdicken dagegen verhindern einen zu schnellen Verschleiß, gehen allerdings mit dem gleichzeitigen Verlust der Rauigkeit einher. Ebenfalls konnte vereinzelt an Probekörpern ein plötzliches Versagen festgestellt werden, welches vermutlich auf eine zu steife Deckversiegelung zurückzuführen ist. Die darunterliegenden Schichten konnten die resultierenden Spannungen nicht aufnehmen, sodass das Beschichtungssystem nach einer gewissen Anzahl an Zyklen plötzlich „im Inneren“ versagte.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Zusammenfassung**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen untersucht. Ziel dabei war es, ein realitätsnahes Prüfverfahren (weiter) zu entwickeln, die beeinflussenden Parameter zu identifizieren und Vorschläge bzgl. zu prüfender verschleißbeeinflussender Parameter darzulegen. Neben der Versuchsdurchführung wurde ein besonderes Augenmerk auf die Ergebnisauswertung und die Entwicklung einer Methode zur Verschleißaufzeichnung gelegt.

Zunächst wurden die Regelwerksituation und die unterschiedlichen Bauweisen für Parkbauten erörtert, die gewährleisten sollen, dass Stahlbetonbauwerke ausreichend vor dem Eintrag von schädlichen Medien (chloridhaltigen Wässern und Kohlendioxid) geschützt sind. Eine Möglichkeit stellt die Applikation von Oberflächenschutzsystemen dar. Oberflächenschutzsysteme sind Beschichtungen auf der Basis organischer Polymere, die in mehreren Schichten auf den Betonuntergrund appliziert werden. Diese Systeme können sowohl starr als auch rissübrückend sein, je nach Wahl des aufgetragenen Kunststoffes und den Anforderungen aus dem Tragwerk. Für den fachgerechten Einsatz von Oberflächenschutzsystemen ist es unabdingbar, den Aufbau bzw. die Struktur der unterschiedlichen polymeren Kunststoffe zu kennen. Die im Parkbau üblicherweise eingesetzten Kunststoffe wurden daher kurz erörtert und die verschiedenen Arten von Oberflächenschutzsystemen dargestellt. Die Dauerhaftigkeit der Oberflächenschutzsysteme ist, aufgrund mechanischer Beanspruchungen durch den PKW-Verkehr, begrenzt. Dadurch werden diese Systeme, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß, zwangsläufig verschliffen. Generell konnte gezeigt werden, dass starre Oberflächenschutzsysteme mechanischer Beanspruchung deutlich besser widerstehen als elastische, rissüberbrückende Systeme.

Die Definition des Begriffs „Verschleiß“ und der am Verschleißprozess beteiligten Parameter wurden ebenfalls erörtert. Weiterhin wurden die beim Lastfall PKW auf Oberflächenschutzsystem vorliegenden Verschleißmechanismen analysiert. Tribologisch betrachtet wurde sowohl der vorgenannte Lastfall als auch die normativen Prüfverfahren zur Bestimmung der Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen. Diese haben gemein, dass sie aus anderen Bereichen entliehen und für Oberflächenschutzsysteme adaptiert wurden. Sowohl die Prüfräder als auch die Auflast bei den normativen Prüfverfahren spiegeln die Belastungen im Parkbau nicht korrekt wider. So werden Oberflächenschutzsysteme mit einer rauen Oberfläche zur Gewährleistung der Griffigkeit und der Rutsicherheit ausgebildet. In den normativen Prüfverfahren sind jedoch nur glatte Oberflächen vorgesehen. Die Anwendbarkeit dieser Prüfverfahren ist spätestens bei der Bestimmung des Verschleißausmaßes nur bedingt möglich. Im deutschsprachigen Raum gibt es noch weitere, nicht normativ geregelte, Prüfverfahren, die für die Bestimmung von Verschleiß an Oberflächen verwendet werden. Diese wurden ebenfalls hinsichtlich der Anwendbarkeit im Parkbau analysiert.

Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurden die wesentlichen Versuche mit dem Parking Abrasion Test durchgeführt. Bei diesem Prüfstand rotiert ein PKW-Rad innerhalb von vier Sekunden mit 450 kg Auflast um 90° auf der Stelle. Nach einer Pause von sieben Sekunden dreht sich das Rad in die Ausgangsstellung zurück. Insgesamt werden 15.000 Rotationen (bzw. Zyklen) durchgeführt. Dieser Prüfstand stellt die Rotation eines PKW-Rades im Stand nach. Scherkräfte, wie sie beim Einparken vorkommen, werden einbezogen. Durch die Pausen werden zusätzlich die Anfahr- und Bremskräfte berücksichtigt.

Nach dem Erreichen zuvor festgelegter Prüfintervalle wird der Verschleiß dokumentiert. Dies kann sowohl zerstörend durch Bohrkernentnahme als auch zerstörungsfrei durch visuelle Begutachtung und / oder Schichtdickenmessung / Laserscanning erfolgen. Die Entnahme von Bohrkernproben ist ein gängiges Verfahren zur Schichtdickenkontrolle in der Praxis. Dies erwies sich bei den Versuchen als problematisch, da an den Löchern (entstanden durch die Entnahme der Bohrkernproben an den am stärksten verschlissenen Stellen) der Verschleiß anschließend von den Rändern aus stärker voranschritt. Ebenfalls konnte der Verschleiß an der vormals stärksten verschlissenen Stelle nicht weiter dokumentiert werden. Zerstörungsfrei wird der Verschleiß durch visuelle Begutachtung und durch Fotos dokumentiert. Detailaufnahmen können durch eine Risslupe aufgenommen werden. Dieses Verfahren erlaubt zwar die Begutachtung der Oberfläche, lässt jedoch keinen Rückschluss über die Verschleißstärke zu. Die Schichtdickenmessung mittels eines magnetisch-induktiven Verfahrens erfordert den bündigen Einbau eines Metallstreifens auf der Betonoberfläche. Die Messungen werden punktuell an den zuvor festgelegten Stellen durchgeführt. Nachteilig ist hier, dass der stärkste Verschleiß nicht zwangsläufig an diesen Stellen auftreten muss. Die Rauigkeit der Oberflächenschutzsysteme erschwert dieses Verfahren zusätzlich. Alternativ kann die ganze Fläche mittels Laserscanning aufgezeichnet werden. Dieses objektive Verfahren ermöglicht es auf der gesamten Fläche den Verschleiß aufzuzeichnen. Über verschiedene Prüfintervalle kann der Verschleiß dokumentiert werden. Weiterhin ist sowohl die Bestimmung des Tiefenverschleißes an der am stärksten verschlissenen Stelle als auch ein Volumenverschleiß über die gesamte Fläche möglich.

Da die Materialeigenschaften die Verschleißbeständigkeit der Oberflächenschutzsysteme wesentlich beeinflussen, wurden zusätzlich die Zugfestigkeiten ermittelt und die Shore-Härten bestimmt. Bei beiden Prüfungen erfolgte die Lagerung unter unterschiedlichen klimatischen Konditionierungen. Die Shore-Härten wurden nicht am gesamten System, sondern nur an den einzelnen Schichten ohne Einstreuung mit Quarzsand gemessen. Dabei wurde deutlich, dass die Materialien auf unterschiedliche klimatische Bedingungen deutlich reagieren und die Festigkeiten beeinflusst werden. Vor allem niedrige Temperaturen und eine Wasserbeaufschlagung können zu Festigkeitsverlusten der eingesetzten Kunststoffe führen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden anschließend Verschleißprüfungen bei verschiedenen Bedingungen mit dem Parking Abrasion Test durchgeführt. Die PAT-Prüfungen bestätigten die Erwartungen, die Verschleißbeständigkeit von einigen Systemen nahm ab.

Ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Korrelation zwischen dem normativen BCA-Prüfverfahren und dem Parking Abrasion Test zu bestimmen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Beanspruchungen konnte bereits theoretisch ermittelt werden, dass dies nicht möglich war. Dies wurde in den durchgeführten Versuchen bestätigt.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Parking Abrasion Test die Verschleißbeständigkeit realitätsnah nachbilden kann. Da die Langlebigkeit eines Systems jedoch, neben der Frequentierung, von klimatischen Bedingungen und den Bedingungen bei der Applikation abhängig ist, können keine generellen Aussagen bzgl. der Dauerhaftigkeit getroffen werden. Durchaus möglich ist jedoch ein Vergleich der Verschleißbeständigkeit unterschiedlicher Systeme bzw. Produkthersteller bei gleichen Herstellungs- und Prüfkonditionen. Dies ermöglicht es die verschiedenen Systeme zu vergleichen und hinsichtlich ihrer Verschleißbeständigkeit zu bewerten.

## **8.2 Ausblick**

In dieser Arbeit konnten im Rahmen der erfolgreich abgeschlossenen und zum Teil noch laufenden Forschungsvorhaben der Technischen Universität Kaiserslautern die Relevanz einiger Prüfparameter des Parking Abrasion Tests untersucht werden. Die Ergebnisse wurden z. T. bereits in Fachzeitschriften und auf Tagungen bzw. Konferenzen präsentiert und stießen auf positive Resonanz. Dies führte dazu, dass bereits eine Empfehlung für die Aufnahme des Verfahrens in die geplante DAfStb-Instandhaltungsrichtlinie ausgesprochen wurde. Es wird darin eine Prüfung mit dem Parking Abrasion Test empfohlen, sobald mehr als 100 Überfahrten pro Tag in einem Parkbau zu erwarten sind. Noch ausstehende Fragen werden in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Förderschiene "WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen" final geklärt, um den Normungsprozess des Prüfverfahrens zu bewerkstelligen. An diesem Projekt sind als Verbundpartner die Sika Deutschland GmbH, der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), die Deutsche Bauchemie, der Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein (DBV), Implenia Construction GmbH und BASF Coatings GmbH beteiligt. Bezüglich der Prüfapparatur (Rotationsgeschwindigkeiten, Pausenzeiten, ...) inklusive der Reifen (Sommer-/ Winterreifen, Profillfläche, Luftdruck, ...), der Probekörper (Anzahl, (Mindest-) Schichtdicken, Klimata bei Herstellung und Prüfung, Prüfzeitpunkt nach Applikation, ...), der Prüfparameter (Mindestbelastung, Belastungsarten, z. B. Wasserbeaufschlagung, Reinigung des Reifenabriebs, ...) und des Auswerte- und Dokumentationsverfahrens (zerstörend, zerstörungsfrei, maximale Verschleißtiefe oder Volumenverlust, Verschleißklassen) sind in den vorausgegangenen Forschungsvorhaben verschiedene Möglichkeiten herausgearbeitet, entwickelt und geprüft worden. Dies hat dazu geführt, dass das Prüfprogramm sehr umfangreich ist. Hier gilt es zu überprüfen, ob diese in einer Norm vereinfacht werden können bzw. welche benötigt werden. Weiterhin gibt es in Deutschland vier Prüfstände, die sich bautechnisch geringfügig unterscheiden. Auf dem Prüfstand an der Technischen Universität Kaiserslautern konnte die Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse bereits bestätigt werden. Ein Abgleich der verschiedenen Prüfstände ist im Rahmen des WIPANO-Projektes vorgesehen.

## **Literaturverzeichnis**

- [Arnold - 2017] Arnold, B.: Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure. Berlin: Springer Vieweg 2017.
- [ARTe - 2011] Institut für Straßenwesen Aachen: Flyer Aachener-Ravelling-Tester (ARTe) 2011.
- [Bargel - 2005] Bargel, H.-J.: Werkstoffkunde. Berlin: Springer 2005.
- [Bastert et al. - 2011] Bastert, H., Krams, J., Meyer, L., Motzke, G.: Wartung bei Parkbauten - Inhalte und juristische Stellung. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), S. 614–621.
- [Bastert u. Kilz - 2013] Bastert, H., Kiltz, D., Meier, A.: Bedarfsplanung bei Parkbauten: Instandhaltung als Bestandteil der gewählten Konzeption?: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2013 – Wartung und Instandhaltung von Parkbauten, S. 11–20.
- [Bastert - 2014] Bastert, H., Meyer, L.: Instandhaltungskonzepte für Parkbauten als Ergebnis der Bedarfsplanung. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), S. 428–434.
- [Bastert et al. - 2015] Bastert, H., Kiltz, D., Meier, A.: Bedarfsplanung bei Parkbauten - Grundlage für eine erfolgreiche Bauaufgabe: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2015 – Dauerhafte Parkbauten in Betonabauweise, S. 1–10.
- [Bayer u. Ebeling - 2006] Bayer, E., Ebeling, K.: Parkhäuser - aber richtig. Ein Leitfaden für Bauherren, Architekten und Ingenieure. Düsseldorf: Verl. Bau + Technik 2006.
- [Becken u. vom Berg - 2008] Beecken, C. A., vom Berg, W.: Intelligente Erhaltungskonzepte: Parkgaragen nachhaltig instand setzen. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 296–303.
- [Beer - 2018] Beer, B.: Planung kundenfreundlicher und wirtschaftlicher Parkbauten: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2018 – Arbeitstagung Parkhäuser und Tiefgaragen, S. 3–45.
- [Blohm u. Schachtner - 2012] Blohm, B., Schachtner, S.: Nachhaltige Tiefgarageninstandsetzung durch Einsatz hochwertiger Systeme und Umsetzung eines Wartungsvertrages: 5. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2012, S. 181–184.

- [Bolz u. de Hessele - 2005] Bolz, C. O., de Hessele, J.: Anforderungsgerechte Sanierung einer Tiefgarage - Teil 2. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), S. 177–178.
- [Book et al. - 2009] Book, U., Huppertz, F., Neisecke, J.: Entwicklung von verlässlichen Prüf- und Bewertungskriterien für das Verschleißverhalten und die Dauerhaftigkeit rissüberbrückender OS-Beschichtungen für befahrbare Betonflächen. Abschlussbericht zum DAfStb-Forschungsvorhaben V 428. Dortmund: Fraunhofer IRB Verl. 2009.
- [Breit et al. - 2015a] Breit, W., Ladner, E.-M., Krams, J.: Nachweis der Verschleißbeständigkeit von Parkhausbeschichtungssystemen unter realitätsnahen Prüfbedingungen. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. 2015.
- [Breit et al. - 2015b] Breit, W., Ladner, E.-M., Krams, J.: Neue Prüfverfahren für eine praxismgerechte Bewertung von befahrenen Oberflächenschutzsystemen: 4. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken - Raupach (Hrsg.) 2015, S. 539–546.
- [Breit u. Ladner - 2017a] Breit, W., Ladner, E.-M.: Dauerhaftigkeit von rissüberbrückungsfähigen Beschichtungssystemen unter realitätsnaher Beanspruchung. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2017.
- [Breit u. Ladner - 2017b] Breit, W., Ladner, E.-M.: Oberflächenschutzsysteme für Parkhäuser im Praxistest: Beton – Herausforderungen in Forschung und Praxis. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher (2017), S. 503–513.
- [Breit u. Ladner - 2018] Breit, W., Ladner, E.-M.: Festlegung von Verschleißklassen für Oberflächenschutzsysteme in Parkhäusern in Abhängigkeit von der Nutzungsfrequenz durch vergleichende Bewertung nach BCA- und PAT-Verfahren. Abschlussbericht 2018.
- [Breit et al. - 2019] Breit, W., Ladner, E.-M., Tusch, A.: Praxisnahe Bewertung des Verschleißverhaltens von befahrenen Oberflächenschutzsystemen – Praxistest vs. Normprüfung. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2019.
- [Breit et al. - 2021] Breit, W., Ladner, E.-M., Schulze, J., Blietschau, S., Merkel, M., Schuler, F.: Untersuchungen zu Umwelteinflüssen auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von befahrenen Ober-

- flächenschutzsystemen während der Applikations- und Nutzungsphase. Abschlussbericht. Veröffentlichung 2021
- [Curbach et al. - 2004] Curbach, M., Zaus, H., Henke, P., Meyer, L., Proske, D.: Zur Anwendung von Expositionsklassen bei Parkhäusern. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), S. 704–710
- [Czichos u. Habig - 2015] Czichos, H., Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.
- [Dauberschmidt u. Vestner - 2015] Dauberschmidt, C., Vestner, S.: Von den Entwurfsgrundsätzen für Tiefgaragen-Bodenplatten zu einer dauerhaften Ausführung. Bautechnik 92 (2015), S. 580–583.
- [Domininghaus et al. - 2008] Domininghaus, H., Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T.: Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. Berlin, New York: Springer 2008.
- [Engelfried u. Eisenkrein - 2012] Engelfried, R., Eisenkrein, H. (Hrsg.): Schäden an polymeren Beschichtungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. 2012.
- [Erhard - 2018] Erhard, P.: Vergleichende Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Oberflächenschutzsystemen mit dem PAT- und BCA-Verfahren. Bachelorarbeit betreut durch Ladner, E.-M. und Breit, W. Kaiserslautern 2018.
- [Erning - 2003] Erning, O.: Wie aussagekräftig sind die neuen Verschleißprüfungen? Kritische Betrachtungen der europäischen Prüfnormen für Industrieestriche. Fußbodentechnik (2003).
- [Eßer u. Schöppel - 2004] Eßer, A., Schöppel, K.: Schäden an Parkdecks mit unzureichender rißbreitenbeschränkender Bewehrung. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), S. 726–734.
- [EuGH - 2014] Der Gerichtshof (Zehnte Kammer): Vertragsverletzung eines Mitgliedstaats – Freier Warenverkehr – Regelung eines Mitgliedstaats, nach der bestimmte Bauprodukte, die mit der Konformitätskennzeichnung ‚CE‘ versehen sind, zusätzlichen nationalen Normen entsprechen müssen – Bauregellisten.  
<http://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?text=&docid=158649&pageIndex=0&doclang=DE&mode=lst&dir=&occ=first&part=1&cid=138510>, 18.11.2019 (16.10.2014).

- [Eyerer et al. - 2008] Eyerer, P., Elsner, P., Hirth, T.: Polymer Engineering. Technologien und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- [Fiebrich - 2006] Fiebrich, M.: Beschichtungen auf direkt befahrenen Tiefgaragenbodenflächen von Weißen Wannen. Physikalische Beanspruchungen - Planungsgrundlagen - alternative Beschichtungsvarianten. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), S. 468–478.
- [Fiebrich - 2013] Fiebrich, M.: Überlegungen zur Abschätzung der Lebensdauer von filmbildenden Oberflächenschutzsystemen für Stahlbetonbauwerke - Ergebnisse von Feldstudien: 3. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken - Raupach (Hrsg.) 2013, S. 191.
- [Fingerloos - 2018] Fingerloos, F.: Besonderheiten der Tragwerksplanung bei Parkbauten: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2018 – Arbeitstagung Parkhäuser und Tiefgaragen, S. 47–74.
- [Fix - 2012] Fix, W.: Großflächige Misserfolge - Grenzen des Einsatzes von OS-Systemen mit flexiblen Reaktionsharzbeschichtungen: 5. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2012, S. 185–187.
- [Flohre - 2004] Flohre, C.: Beschichtung von Parkhäusern und Tiefgaragen - Befahrene Flächen unter Berücksichtigung von DIN 1045, DAfStb-Heft 525 und RILI SIB. LGIB-Rheinland-Pfalz / Saarland 21.04.2004.
- [Flohre - 2013] Flohre, C.: Wartungsarme und wartungsintensive Bauweisen im Vergleich - Was bedeutet "Robustheit"?: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) Heft 27 (2013) – Wartung und Instandhaltung von Parkbauten, S. 21–31.
- [Flohre – 2018] Flohre, C.: Die neuen Ausführungsvarianten A, B und C für befahrene Flächen aus Beton: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2018 – Arbeitstagung Parkhäuser und Tiefgaragen, S. 75–90.
- [de Gee – 1972] de Gee, A. W. J.: Verschleiß und Verschleißprüfung. Zeitschrift für Werkstofftechnik 3 (1972), S. 58–64.
- [Gehlen u. Weydert - 2004] Gehlen, C., Weydert, R.: Schäden an Parkhäusern und Tiefgaragen - Wahl der geeigneten Instandsetzungsstrategie. Beton (2004), S. 134–141.



- [Gieler u. Dimmig-Osburg - 2006] Gieler, R. P., Dimmig-Osburg, A.: Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung: Springer-Verlag 2006.
- [Heene - 2014] Heene, M.: Vergleichende Untersuchungen zur Rautiefenermittlung nach dem Sandflächenverfahren und Laserabtastverfahren sowie zum Einfluss der Alterung von Parkhausbeschichtungen auf deren Verschleißwiderstand. Diplomarbeit betreut an der Technischen Universität Kaiserslautern durch Ladner, E.-M. und Breit, W. Kaiserslautern 2014.
- [Heinke - 1975] Heinke, G.: Verschleiß - eine Systemeigenschaft. Auswirkungen auf die Verschleißprüfung. Zeitschrift für Werkstofftechnik 6 (1975), S. 164–169.
- [Huppertz u. Neisecke - 2004] Huppertz, F., Neisecke, J.: Entwicklung eines praxisrelevanten Verschleißtests für rissüberbrückende Parkhausbeschichtungen – Stand der Forschung. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 2004 (10), S. 497–510.
- [Jung et al. - 2005] Jung, W., Schwamborn, B., Stenner, R.: Beschichtungssysteme für Rampen von Parkhäusern - Ein viel diskutiertes Thema. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2005, S. 39–48.
- [Klempau - 2004] Klempau, F.: Untersuchung zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug. Dissertation. TU Darmstadt 2004.
- [Kleyr - 2018] Kleyr, G.: Einfluss der Deckversiegelung und des Splitts auf das Verschleißverhalten von Oberflächenschutzsystemen. Masterarbeit betreut an der Technischen Universität Kaiserslautern durch Ladner, E.-M. und Breit, W. Kaiserslautern 2018.
- [Krams - 2010] Krams, J.: Wartung und Instandhaltung von Parkbauten: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2010 – Parkhäuser und Tiefgaragen, S. 67–80.
- [Krams - 2011] Krams, J.: Instandhaltung von Parkkonstruktionen. 6. GUEP Planertag. Krefeld 16.11.2011 (Vortrag).
- [Ladner - 2013] Ladner, E.-M.: Neue Prüfmethode zur Bestimmung des Verschleißes an Parkhausbeschichtungssystemen: Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium vom 07.-08. November 2013 in Bochum, S. 431–436.

- [Ladner et al. - 2013a] Ladner, E.-M., Krams, J., Breit, W., Schulze, J.: Bestimmung des Verschleißes an Oberflächenschutzsystemen von Parkbauten: 3. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken - Raupach (Hrsg.) 2013, S. 177–184.
- [Ladner et al. - 2013b] Ladner, E.-M., Krams, J., Breit, W.: Abrasion Test for Surface Protection Systems: Uzoegbo, Schmidt (Hrsg.) 2013 – International Conference on Advances, S. 1073–1080.
- [Ladner et al. - 2014a] Ladner, E.-M., Breit, W., Schulze, J., Krams, J.: Neue Verschleißprüfmethoden an Oberflächenschutzsystemen von Parkbauten: 6. Kolloquium Parkbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2014, S. 225–230.
- [Ladner et al. - 2014b] Ladner, E.-M., Krams, J., Breit, W.: Realitätsnahe Verschleißprüfverfahren für Beschichtungssysteme. Bautechnik 91 (2014), S. 711–719.
- [Ladner u. Breit - 2014] Ladner, E.-M., Breit, W.: Comparative analysis on surface protection systems for car parks: Breit, Kohlmeyer et al. (Hrsg.) 2014 – Current Scientific Challenges in Concrete, S. 89–96.
- [Ladner et al. - 2016] Ladner, E.-M., Müller, M., Breit, W.: Bestimmung des Verschleißes und der Materialeigenschaften von Oberflächenschutzsystemen unter realitätsnaher Beanspruchung. In: Nguyen, V. T., Krüger, M., Freytag, B., Santner, G. (Hg.): 3. Grazer Betonkolloquium. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz (2016), S. 239–246.
- [Ladner - 2017] Ladner, E.-M.: Oberflächenschutzsysteme im praxisnahen Verschleißtest - Bestimmung von Materialparameter unter verschiedenen Randbedingungen und deren Einfluss auf das Verschleißverhalten von Oberflächenschutzsystemen. Bautechnik 112 (2017), S. 459.
- [Ladner u. Breit - 2017a] Ladner, E.-M., Breit, W.: Determination of wear and material properties of surface protection systems for car parks. In: Schutter, G. de, Belie, N. de, Janssens, A., van Den Bossche, N. (Hg.): XIV DBMC - 14 th Interenational Conference on Durability of Building Materials and Components. Paris: RILEM Publications S.A.R.L. (2017), S. 267–268.

- [Ladner u. Breit - 2017b] Ladner, E.-M., Breit, W.: Oberflächenschutzsysteme im praxisnahen Verschleißtest - Bestimmung von Materialparameter unter verschiedenen Randbedingungen und deren Einfluss auf das Verschleißverhalten von Oberflächenschutzsystemen: Breit, Kurz et al. (Hrsg.) 2017 – Beiträge zur 5, S. 13–21.
- [Ladner et al. - 2018] Ladner, E.-M., Breit, W., Pusel, T., Kühner, S.: Prüfung der Verschleißbeständigkeit an befahrenen Oberflächenschutzsystemen: 8. Kolloquium Parkbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2018, S. 237–244.
- [Littmann u. Pleyers - 2004] Littmann, K., Pleyers, G.: Chemische Anforderungen an Oberflächenschutzsysteme in Parkbauten: 1. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2004, S. 563–567.
- [Littmann - 2013] Littmann, K.: Parameter der Dauerhaftigkeit von Betonbeschichtungen - Praxisbeispiele: 3. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken - Raupach (Hrsg.) 2013, S. 185–190.
- [Magner - 2012] Magner, J.: Oberflächenschutz / Abdichtung von Parkhausbodenflächen: 5. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2012, S. 277–286.
- [Manns et al. - 1982] Manns, W., Schneider, H., Elsässer, H.: Simulierung der Verschleißbeanspruchung von Estrichen im Industriebau durch Flurförderzeuge. Boden, Wand, Decke 28 (1982), S. 74–76.
- [Meyer - 2005] Meyer, L.: Das neue DBV-Merkblatt Parkhäuser und Tiefgaragen. Erläuterungen zum Hintergrund und Darstellung wesentlicher Inhalte. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), S. 828–832.
- [Meyer - 2013] Meyer, L.: Was bedeutet Instandhaltung und wie ist der Stand der Regelungsetzung? Ein Überblick in Bezug auf Parkhäuser und Tiefgaragen. In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hg.): Wartung und Instandhaltung von Parkbauten. DBV-Heft 27 (2013), S. 1–9.
- [Motzke - 2012] Motzke, G.: Parkhäuser und Tiefgaragen. Zur rechtlichen Wertigkeit des gleichnamigen Merkblatts des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins e.V., Ausgabe September 2010. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 579–589.
- [Müller - 2009] Müller, R.: Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug. De Gruyter Lehrbuch. 2009.

- [Münchner Runde - 2010] "Münchner Runde": Technische Festlegungen für Tiefgaragenbauwerke. Stand Januar 2010.
- [Münchner Runde - 2013] "Münchner Runde": Tiefgaragenbauwerke und Parkgaragen. Stand 01. März 2013: Grundsätze Regelbauweise NEUBAU.
- [Pusel et al. - 2018] Pusel, T., Grötzinger, J., La Spina, S.: Parkhausbeschichtungen mit erhöhter Feuchtigkeitstoleranz: 8. Kolloquium Parkbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2018, S. 83–85.
- [Pusel - 2020] Pusel, T.: Einflussfaktoren für hoch verschleißfeste Parkhausbeschichtungen. Technische Akademie Esslingen, Ostfildern 04.02.2020.
- [Raps et al. - 2013] Raps, K., Schmidt, D., Rohr-Suchalla, K.: Schutz und Instandsetzung von Parkhäusern und Tiefgaragen. Schadensbilder, Instandhaltung, Instandsetzung, Mängelhaftung und Gewährleistung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. 2013.
- [Raupach - 2005] Raupach, M.: Notwendigkeit und Dauerhaftigkeit von Parkhausbeschichtungen. <http://www.betoninstandhaltung.com/veroeffentlichungen/20050301raupach.pdf>, 29.09.2019.
- [Raupach et al. - 2006] Raupach, M., Wolff, L., Rößler, G.: Auswahl geeigneter Oberflächenschutzsysteme in Parkbauten. Grundlagen und aktuelle Regelungen. Beton 56 (2006), S. 446–452.
- [Renken - 2018] Renken, L.: Endlich! Der umweltfreundliche, wasserdurchlässige Asphaltbelag. [https://www2.agfs-nrw.de/fileadmin/agfs/Events\\_Kampagnen/03-01\\_Kongresse/AGFS-Kongress\\_2018/AGFS-Kongress\\_2018\\_Der\\_umweltfreundliche\\_wasserdurchlaessige\\_Aspahltbelag.pdf](https://www2.agfs-nrw.de/fileadmin/agfs/Events_Kampagnen/03-01_Kongresse/AGFS-Kongress_2018/AGFS-Kongress_2018_Der_umweltfreundliche_wasserdurchlaessige_Aspahltbelag.pdf), 13.02.2019.
- [Reul - 2011] Reul, H.: Sanierung von Tiefgaragen und Parkhäusern. Schäden - Ursachen - Maßnahmen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. 2011.
- [Rieche - 1979] Rieche, G.: Rissüberbrückende Kunststoffbeschichtungen für mineralische Baustoffe. Farbe + Lack 85 (1979), S. 824–831.
- [Roeske - 2004] Roeske, D.: Parkhaussanierungen. Wege zu anforderungsgerechten Lösungen mit Flüssigkunststoffen. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), S. 735–740.

- [Rösler et al. - 2016] Rösler, J., Harders, H., Bäker, M.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016.
- [Schnell et al. - 2014] Schnell, J., Oster, S., Casucci, D.: Systematische Erforschung der Rissflankenbruchneigung von befahrbaren Industrieböden. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. 2014.
- [Schöppel - 2002] Schöppel, K.: Schäden in Tiefgaragen und deren Instandsetzung. Vortrag bei der Regionaltagung des Deutschen Beton-Vereins e.V. in München im Februar 2002. München Februar 2002.
- [Schöppel u. Stenzel - 2012] Schöppel, K., Stenzel, G.: Konstruktionsregeln für Parkbauten in Betonbauweise. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 302–316.
- [Schubert et al. - 2016] Schubert, M., Dauberschmidt, C., Eltschig, C., Nechvatal, D., Rapolder, M., Schedl, T.: Untersuchungen zu Herstellungs- und Instandhaltungskosten von unterschiedlichen Konzepten zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Parkbauten. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), S. 564–575.
- [Schwamborn u. Wolff - 2012] Schwamborn, B., Wolff, L.: Immer wieder Diskussionen über den Verschleiß von befahrbaren Oberflächenschutz- bzw. Abdichtungssystemen – Wer meint was?: 5. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2012, S. 287–295.
- [Statistik-Portal - 2019] Das Statistik-Portal: Menge des verbrauchten Streusalzes im Winterdienst auf Straßen in Deutschland im Zeitraum von 1992 bis 2010 (in Millionen Tonnen). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/282120/umfrage/streusalz-verbrauch-auf-deutschen-strassen/>, 29.09.2019.
- [Stenzel - 2010] Stenzel, G.: Schäden an Parkbauten vermeiden - Konstruktionsregeln für die Tragwerksplanung: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2010 – Parkhäuser und Tiefgaragen, S. 81–86.
- [Tobisch - 1981] Tobisch, K.: Über den Zusammenhang zwischen Shore A und Shore D Härte. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe 34 (1981), S. 347–349.
- [Wehrle - 2006] Wehrle, S.: Reparaturfähigkeit von Parkhausbeschichtungen (OS-Systeme) unter Beachtung der allgemeinen bauaufsichtlichen

- Prüfzeugnisse: 2. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2006, S. 465–468.
- [Wolff - 2010] Wolff, L.: Beschichtung direkt befahrender Parkdecks. Welche Lösung an welcher Stelle? In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hg.): Parkhäuser und Tiefgaragen - Das neue DBV-Merkblatt. DBV-Heft 20 (2010), S. 59–66.
- [Wolff - 2018a] Wolff, L.: Schutzmaßnahmen für direkt befahrene Verkehrsflächen - Oberflächenschutz oder Abdichtung?: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.) 2018 – Arbeitstagung Parkhäuser und Tiefgaragen, S. 91–115.
- [Wolff - 2018b] Wolff, L.: Die richtige Auswahl von Bauprodukten für die Betoninstandsetzung. LLG Betoninstandsetzung und Bauwerkserhaltung Hessen-Thüringen e.V., 29. Informations-Seminar Bauwerke instand setzen – heute und morgen. Bad Nauheim 7.11.2011 (Vortrag)
- [Wolff u. Raupach - 2008] Wolff, L., Raupach, M.: Beschichtungsschäden - Schadensmechanismen und Lösungsansätze: 3. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2008.
- [Wolff u. Schwamborn - 2013] Wolff, L., Schwamborn, B.: Inspektion, Wartung und Instandhaltung von Beschichtungs- und Abdichtungssystemen bei Parkbauten. In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hg.): Wartung und Instandhaltung von Parkbauten. DBV-Heft 27 (2013), S. 63–73.
- [Wolff u. Schwamborn - 2017] Wolff, L., Schwamborn, B.: Instandhaltung von Oberflächenschutz- und Abdichtungssystemen in Parkbauten. In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hg.): Ist-Zustandserfassung von Parkbauten in Betonbauweise. DBV-Heft 39 (2017), S. 65–76.
- [Zilg et al. - 2008] Zilg, C., Pusel, T., Bänziger, H.: Abnutzungsprüfung von OS Parkhaussystemen unter "Real-Bedingungen": 3. Kolloquium Verkehrsbauten - Gieler-Breßmer (Hrsg.) 2008.

## **Liste der verwendeten Technischen Regelwerke**

[DAfStb - 2001]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (einschließlich 2. Berichtigung vom Dezember 2005). Berlin: Beuth Verlag GmbH (Oktober 2001).
[DAfStb - 2016]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb): Gelbdruck Instandhaltung von Betonbauteilen (Instandhaltungs-Richtlinie). Berlin (14.06.2016).
[DAfStb Heft 525 - 2010]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb): Heft 525: Erläuterungen zu DIN 1045-1, 2. überarbeitete Auflage 2010 (2010).
[DBV - 2010]	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.: Merkblatt: Parkhäuser und Tiefgaragen (September 2010).
[DBV - 2018]	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.: Merkblatt: Parkhäuser und Tiefgaragen. Berlin: Eigenverlag (Januar 2018).
[DIBt - 2019]	Prioritätenliste - Ausgewählte verwendungsspezifische Leistungsanforderungen zur Erfüllung der Bauwerksanforderungen, 25.02.2019 ( <a href="https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/IIN/Prioritaetenliste_Ueberarbeitung_hEN.pdf">https://www.dibt.de/fileadmin/dibt- website/Dokumente/Referat/IIN/Prioritaetenliste_Ueberar beitung_hEN.pdf</a> , 02.01.2021)
[DIN 1076]	DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung.
[DIN 13813]	DIN 13813:2003-01: Estrichmörtel, Estrichmassen und Estriche - Estrichmörtel und Estrichmassen - Eigenschaften und Anforderungen.
[DIN 18532-6]	DIN 18532-6:2017-07: Abdichtung von befahrbaren Verkehrsflächen aus Beton – Teil 6: Abdichtung mit flüssig zu verarbeitenden Abdichtungsstoffen (2017).
[DIN 18560-7]	DIN 18560-7:2004-04: Estriche im Bauwesen – Teil 7: Hochbeanspruchbare Estriche (Industriestriche).
[DIN 50320]	DIN 50320:1976-11: Verschleiß - Begriffe - Systemanalyse von Verschleißvorgängen - Gliederung des Verschleißgebietes (1976 - zurückgezogen).
[DIN EN 206]	DIN EN 206:2017-01: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.

[DIN EN 660-1]	DIN EN 660-1:1999-06: Elastische Bodenbeläge – Ermittlung des Verschleißverhaltens – Teil 1: Stuttgarter Prüfung (1999 - zurückgezogen).
[DIN EN 1062-7]	DIN EN 1062-7:2004-08: Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich - Teil 7: Bestimmung der rissüberbrückenden Eigenschaften (2004).
[DIN EN 1045-2]	DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
[DIN EN 1045-3]	DIN 1045-3:2012-03: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670.
[DIN EN 1542]	DIN EN 1542:1999-07: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch (1999).
[DIN EN 1766]	DIN EN 1766:2000-03: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Referenzbetone für Prüfungen (2000).
[DIN EN 1991-1-1]	DIN EN 1991-1-1:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau (2010).
[DIN EN 1992]	DIN EN 1992-2:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln; Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 + AC:2008.
[DIN EN 13036-4]	DIN EN 13036-4:2011-12: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffbarkeit von Oberflächen: Der Pendeltest (2011).
[DIN EN 13197]	DIN EN 13197:2014-07: Straßenmarkierungsmaterialien - Verschleißsimulator (2014).
[DIN EN 13687-1]	DIN EN 13687-1:2002-05: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken Prüfverfahren - Bestimmung der



	Temperaturwechselverträglichkeit - Teil 1: Frost-Tau-Wechselbeanspruchung mit Tausalzangriff (2002).
[DIN EN 13687-2]	DIN EN 13687-2:2002-05: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken Prüfverfahren - Bestimmung der Temperaturwechselverträglichkeit - Teil 2: Gewitterregenbeanspruchung (Temperaturschock) (2002).
[DIN EN 13813]	DIN EN 13813:2003-01: Estrichmörtel, Estrichmassen und Estriche – Estrichmörtel und Estrichmassen – Eigenschaften und Anforderungen (2003).
[DIN EN 13892-3]	DIN EN 13892-3:2015-03: Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 3: Bestimmung des Verschleißwiderstands nach Böhme (2015).
[DIN EN 13892-4]	DIN EN 13892-4:2003-02: Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 4: Bestimmung des Verschleißwiderstands nach BCA (2003).
[DIN EN 13892-5]	DIN EN 13892-5:2003-09: Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 5: Bestimmung des Widerstandes gegen Rollbeanspruchung von Estrichen für Nutzschichten (2003).
[DIN EN ISO 291]	DIN EN ISO 291:2008-08: Kunststoffe – Normalklimate für Konditionierung und Prüfung (2008).
[DIN EN ISO 868]	DIN EN ISO 868:2003-10: Kunststoffe und Hartgummi - Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte) (2003).
[DIN EN ISO 527-1]	DIN EN ISO 527-1:2012-06: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (2012).
[DIN EN ISO 527-2]	DIN EN ISO 527-2:2012-06: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (2012).
[DIN EN ISO 5470-1]	DIN EN ISO 5470-1:1999-09: Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien – Bestimmung des Abriebwiderstandes – Teil 1: Taber-Abriebprüfgerät (1999).
[DIN ISO 7619-1]	DIN ISO 7619-1:2012-02: Elastomere oder thermoplastische Elastomere –Bestimmung der Eindringhärte – Teil 1: Durometer-Verfahren (Shore-Härte) (2012).

[DIN EN 1992-2]	DIN EN 1992-2:2011-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (2011).
[DIN EN 1504-2]	DIN EN 1504-2:2005-01: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton (2005).
[DIN V 18026]	DIN V 18026:2006-06: Oberflächenschutzsysteme für beton aus Produkten nach DIN EN 1504-2:2005-01 (2006 - zurückgezogen).
[ECE-R30 - 2008]	Regelung Nr. 30 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Luftreifen für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger. ECE-R30 30.07.2008.
[ISO 2286]	ISO 2286-1:2016-09: Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien - Bestimmung der Rollencharakteristik - Teil 1: Bestimmung der Länge, Breite und Nettomasse
[ISO 5084]	ISO 5084:1996-09: Textilien - Bestimmung der Dicke von Textilien und textilen Erzeugnissen
[GfT - 2002]	Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT): Arbeitsblatt 7 Tribologie. Verschleiß, Reibung - Definitionen, Begriffe, Prüfung 2002.
[ZTV - 2003]	Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag (Januar 2003).
[ZTV-ING - 2017]	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Bonn (02/2017).

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Schadensbilder an befahrbaren, polymeren Beschichtungen in der Praxis	3
Abb. 1.2: Schadensbilder befahrbarer, polymerer Beschichtungen auf Beton nach [Wolff u. Raupach - 2008].....	5
Abb. 1.3: Darstellung der Fragestellungen und der Vorgehensweise dieser Arbeit...	7
Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Wirkungsweise von Hydrophobierung, Imprägnierung und Beschichtung aus [DIN EN 1504-2].....	10
Abb. 2.2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 8-Systems .....	13
Abb. 2.3: Schichtaufbau anhand eines OS 8-System-Musters .....	13
Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 11b-Systems .....	14
Abb. 2.5: Schichtaufbau anhand eines OS 11b-System-Musters .....	14
Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 11a-Systems .....	15
Abb. 2.7: Schichtaufbau anhand eines OS 11a-System-Musters .....	15
Abb. 2.8: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 13-Systems .....	16
Abb. 2.9: Schichtaufbau anhand eines OS 13-System-Musters .....	16
Abb. 2.10: Schematische Darstellung des Aufbaus eines OS 10 / 14-Systems .....	17
Abb. 2.11: Schichtaufbau anhand eines OS 10-System-Musters .....	17
Abb. 2.12: Verhalten von Elastomeren bei Krafteinwirkung: a vor, b während, c nach der Krafteinwirkung aus [Arnold - 2017] .....	27
Abb. 2.13: Strukturformel Polyurethan.....	28
Abb. 2.14: Strukturformel Epoxidharze.....	29
Abb. 2.15: Strukturformel Polymethylmethacrylat (PMMA) .....	29
Abb. 2.16: Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls (E-Moduls) von Kunststoffen aus [Eyerer et al. - 2008] .....	31
Abb. 2.17: Einfluss der Schichtdicke auf die überbrückbare Rissbreite aus [Rieche - 1979].....	32
Abb. 3.1: Grund- und Gegenkörper beim Lastfall PKW auf Oberflächenschutzsystem .....	40
Abb. 3.2: Überblick der Verschleißmechanismen in Abhängigkeit der tribologischen Beanspruchung aus [Czichos u. Habig - 2015] .....	41
Abb. 3.3: Übergang von Haftung zu Gleiten in Abhängigkeit der wirkenden Kraft $F_N$ und der Reibungskraft $F_R$ .....	43
Abb. 3.4: Veranschaulichung des Prinzips der Kornausbrüche am Oberflächenschutzsystem aus [Kleyn - 2018] .....	45

Abb. 3.5: Prüfapparatur für Taber-Abriebverfahren nach [DIN EN ISO 5470-1] .....	47
Abb. 3.6: Prüfapparatur für BCA-Verfahren nach [DIN EN 13892-4] .....	48
Abb. 3.7: Aufbau der Prüfapparatur zur Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach Böhme nach [DIN EN 13892-3] .....	49
Abb. 3.8: Verschleißprüfmaschine Bottroper Rad mit Belastungskammer (1) und Antrieb (2) aus [Book et al. - 2009].....	51
Abb. 3.9: Verschleißsimulator für Straßenmarkierungsmaterialien nach [DIN EN 13197] .....	51
Abb. 3.10: Prüfapparatur für Driving Abrasion Test (DAT).....	52
Abb. 3.11: Prüfapparatur für Stuttgarter Prüfung nach [DIN EN 660-1] .....	60
Abb. 3.12: Prüfaufbau RWA-Verfahren nach [DIN EN 13892-5].....	61
Abb. 3.13: Aachener Ravelling Tester (ARTe) aus [ARTe - 2011].....	62
Abb. 3.14: Prüfapparatur zur Ermittlung des Verschleißes der Sika Deutschland GmbH [Ladner et al. - 2018] .....	63
Abb. 3.15: Prüfschema der Verschleißprüfung mit dem Bänziger Rad der Sika Deutschland GmbH nach [Ladner et al. - 2018] .....	63
Abb. 3.16: Prüfapparatur für den Parking Abrasion Test (PAT) .....	64
Abb. 4.1: Weiterentwickelte Prüfapparatur für den Parking Abrasion Test (PAT) ....	73
Abb. 4.2: Schematische Darstellung der Anordnung der vier möglichen Messstellen beim Parking Abrasion Test auf einem Probekörper mit der Kantenlänge von 50 cm.....	74
Abb. 4.3: Vergleich Verschleißentwicklung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl an OS 11a- und OS 11b-Systemen .....	78
Abb. 5.1: Dokumentation der visuellen Begutachtung nach Verschleißbeanspruchung mit dem Parking Abrasion Test am Beispiel eines OS 11b-Systems (a) 0 Zyklen (VK 1), b) 1.000 Zyklen (VK 4), c) 3.000 Zyklen (VK 5), d) 5.000 Zyklen (VK 5), e) > 10.000 Zyklen (VK 5).....	82
Abb. 5.2: Beispiel zur Ermittlung der Abtragstiefe $A_{BK}$ einer Bohrkernprobe an einem OS 11b-System aus der Differenz (rote Pfeile) der Schichtdicke (links: nach Verschleißbeanspruchung, rechts: ohne Verschleißbeanspruchung) .....	83
Abb. 5.3: Draufsicht OS 11b-System vor (links) und nach (rechts) der Prüfung mit dem Parking Abrasion Test .....	84
Abb. 5.4: Schichtdicken an einem OS 11b-System vor (links) und nach (rechts) der Prüfung mit dem Parking Abrasion Test .....	84
Abb. 5.5: Darstellung der magnetisch-induktiven Schichtdickenmessung mit Messschablone .....	86

Abb. 5.6: Auswertebeispiel einer Schichtdickenmessung über die prozentuale Gesamtschichtdicke und der Zyklenanzahl an einem OS 11b-System mit einem induktiven Messverfahren an 5 Messstellen .....	87
Abb. 5.7: Schematische Darstellung der Funktionsweise des eingesetzten 2D /3D-Lasers.....	88
Abb. 5.8: Maximale Verschleißtiefe am Beispiel von P1_PAT über 15.000 Zyklen unter Angabe der linearen Regressionen .....	91
Abb. 5.9: Tiefenabtrag am Querschnitt in Plattenmitte am Beispiel von P1_PAT über 15.000 Zyklen .....	92
Abb. 5.10: Volumenabtragsentwicklung beim Parking Abrasion Test über 15.000 Zyklen am Beispiel von P1_PAT .....	95
Abb. 6.1: Maximaler Tiefenabtrag der geprüften OS-Systeme im Vergleich der PAT- / BCA-Prüfungen .....	100
Abb. 6.2: Volumenabtrag im Vergleich der PAT- / BCA-Prüfungen .....	101
Abb. 6.3: Zeitliche Temperaturentwicklung beim Parking Abrasion Test und Bänziger Rad in Abhängigkeit von Reifengröße und Prüfparametern an einer Stahlplatte .....	106
Abb. 6.4: Darstellung der Anordnung der Messfühler 1 bis 3 für die Bestimmung der Temperaturentwicklung mit dem Parking Abrasion Test .....	108
Abb. 6.5: Fühler 1 bis 3 auf der Unterseite der Stahlplatte zur Dokumentation der Temperaturentwicklung .....	109
Abb. 6.6: Vergleich der unterschiedlichen Aufstandsflächen und Profile von Sommerreifen (links, Nr. 1) und Winterreifen (rechts, Nr.2) am Beispiel der Größe 165/65 R15.....	110
Abb. 6.7: Gegenüberstellung der zeitlichen Temperaturentwicklung auf einer Stahlplatte gemessen mit Fühler 3 (Feldmitte) in Abhängigkeit von der Reifengröße und Unterscheidung in Sommerreifen (schwarze Linien) und Winterreifen (grüne Linien).....	111
Abb. 6.8: Gegenüberstellung der zeitlichen Temperaturentwicklung auf einem OS 11a-System gemessen mit Fühler 3 (Feldmitte) in Abhängigkeit von der Reifengröße und Unterscheidung in Sommerreifen (schwarze Linien) und Winterreifen (grüne Linien).....	112
Abb. 6.9: Einfluss der Intervalldauer hinsichtlich der Temperaturentwicklung während der Verschleißprüfung mit dem Parking Abrasion Test bei einer Auflast von 400 kg [Breit et al. - 2015a] .....	114
Abb. 6.10: Maximaler Tiefenabtrag im Vergleich mit / ohne Deckversiegelung .....	117
Abb. 6.11: Volumenabtrag im Vergleich mit / ohne Deckversiegelung .....	117
Abb. 6.12: Probengeometrie der Zugproben .....	121

Abb. 6.13: Typische Spannungs-Dehnungskurven aus [DIN EN ISO 527-1].....	123
Abb. 6.14: Vergleich der Zugmodule an den Einzelkomponenten von Oberflächenschutzsystemen ggf. zusätzlich mit einer Abstreuerung bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min und unterschiedlichen Lagerungsbedingungen.....	125
Abb. 6.15: Vergleich der Zugfestigkeiten an den Einzelkomponenten von Oberflächenschutzsystemen ggf. zusätzlich mit einer Abstreuerung bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min und unterschiedlichen Lagerungsbedingungen.....	126
Abb. 6.16: Festigkeiten in Abhängigkeit der Lagerung bei Zugfestigkeit und Zugmodul (Einzelkomponenten) .....	127
Abb. 6.17: Festigkeiten in Abhängigkeit der Lagerung bei Zugfestigkeit und Zugmodul (System).....	128
Abb. 6.18: Einfluss des Quarzsandes auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten am Beispiel von den Proben H / K / L mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min.....	129
Abb. 6.19: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit am Beispiel von Probe L .....	130
Abb. 6.20: Prüfaufbau an wassergesättigtem Probekörper mit dem Parking Abrasion Test .....	132
Abb. 6.21: Maximaler Tiefenabtrag im Vergleich nass / trockener Lagerung.....	133
Abb. 6.22: Volumenabtrag im Vergleich nass / trockener Lagerung.....	133
Abb. 6.23: Verteilung Splitt vor (links) und nach (rechts) einem Versuch mit dem Parking Abrasion Test .....	140
Abb. 6.24: Maximaler Tiefenabtrag im Vergleich Beanspruchung mit / ohne Splitt .	141
Abb. 6.25: Volumenabtrag im Vergleich Beanspruchung mit / ohne Splitt.....	141
Abb. 6.26: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Grundierungen aus EP und PMMA .....	146
Abb. 6.27: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Schwimmschichten aus EP und PMMA....	147
Abb. 6.28: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Verschleißschichten aus PUR und PMMA	147
Abb. 6.29: Abhängigkeit der Shore-Härte D von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung an Deckversiegelungen aus PUR und PMMA	148
Abb. 6.30: Abhängigkeit der Shore-Härte D (3 Sekunden Prüfzeit) von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 11a- System .....	148

Abb. 6.31: Abhängigkeit der Shore-Härte D (3 Sekunden Prüfzeit) von den Lagerungstemperaturen ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 10-System .....	149
Abb. 6.32: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / -20 °C (Simulation Winterzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 11a-System .....	149
Abb. 6.33: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / 50 °C (Simulation Sommerzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 11a-System .....	150
Abb. 6.34: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / -20 °C (Simulation Winterzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 10-System .....	151
Abb. 6.35: Abhängigkeit der Shore-Härte D von Temperaturzyklen 20 °C / 50 °C (Simulation Sommerzeit) ab dem Zeitpunkt der Herstellung am OS 10-System .....	151
Abb. 8.1: Schematische Darstellung des Ausgleich der Schiefstellung: Links vor Ausgleich der Schiefstellung, rechts nach Ausgleich der Schiefstellung	196
Abb. 8.2: P1_PAT: Querschnitt in Plattenmitte .....	204
Abb. 8.3: P1_BCA: Querschnitt in Plattenmitte .....	204
Abb. 8.4: P1_PAT: Maximale Verschleißtiefe .....	205
Abb. 8.5: P1_BCA: Maximale Verschleißtiefe .....	205
Abb. 8.6: P1_PAT: Volumenabtrag .....	206
Abb. 8.7: P1_BCA: Volumenabtrag .....	206
Abb. 8.8: P2_PAT: Querschnitt in Plattenmitte .....	213
Abb. 8.9: P2_BCA: Querschnitt in Plattenmitte .....	213
Abb. 8.10: P2_PAT: Maximale Verschleißtiefe .....	214
Abb. 8.11: P2_BCA: Maximale Verschleißtiefe .....	214
Abb. 8.12: P1_PAT: Volumenabtrag .....	215
Abb. 8.13: P2_BCA: Volumenabtrag .....	215
Abb. 8.14: P3_PAT: Querschnitt in Plattenmitte .....	222
Abb. 8.15: P3_BCA: Querschnitt in Plattenmitte .....	222
Abb. 8.16: P3_PAT: Maximale Verschleißtiefe .....	223
Abb. 8.17: P3_BCA: Maximale Verschleißtiefe .....	223
Abb. 8.18: P3_PAT: Volumenabtrag .....	224
Abb. 8.19: P3_BCA: Volumenabtrag .....	224

Abb. 8.20: P4_PAT: Querschnitt in Plattenmitte .....	231
Abb. 8.21: P4_BCA: Querschnitt in Plattenmitte.....	231
Abb. 8.22: P4_PAT: Maximale Verschleißtiefe .....	232
Abb. 8.23: P4_BCA: Maximale Verschleißtiefe.....	232
Abb. 8.24: P4_PAT: Volumenabtrag.....	233
Abb. 8.25: P4_BCA: Volumenabtrag .....	233
Abb. 8.26: P5_PAT: Querschnitt in Plattenmitte .....	239
Abb. 8.27: P5_BCA: Querschnitt in Plattenmitte.....	239
Abb. 8.28: P5_PAT: Maximale Verschleißtiefe .....	240
Abb. 8.29: P5_BCA: Maximale Verschleißtiefe.....	240
Abb. 8.30: P5_PAT: Volumenabtrag.....	241
Abb. 8.31: P5_BCA: Volumenabtrag .....	241
Abb. 8.32: P6_PAT: Querschnitt in Plattenmitte .....	248
Abb. 8.33: P6_BCA: Querschnitt in Plattenmitte.....	248
Abb. 8.34: P6_PAT: Maximale Verschleißtiefe .....	249
Abb. 8.35: P6_BCA: Maximale Verschleißtiefe.....	249
Abb. 8.36: P6_PAT: Volumenabtrag.....	250
Abb. 8.37: P6_BCA: Volumenabtrag .....	250
Abb. 8.38: P7_PAT: Querschnitt in Plattenmitte .....	257
Abb. 8.39: P7_BCA: Querschnitt in Plattenmitte.....	257
Abb. 8.40: P7_PAT: Maximale Verschleißtiefe .....	258
Abb. 8.41: P7_BCA: Maximale Verschleißtiefe.....	258
Abb. 8.42: P7_PAT: Volumenabtrag.....	259
Abb. 8.43: P7_BCA: Volumenabtrag .....	259
Abb. 8.44: Aufstandsfläche 165/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 1) .....	260
Abb. 8.45: Aufstandsfläche 165/65 R15 (Winterreifen, Nr.2) .....	260
Abb. 8.46: Aufstandsfläche 175/55 R15 (Sommerreifen, Nr. 3) .....	261
Abb. 8.47: Aufstandsfläche 175/60 R15 (Winterreifen, Nr. 4) .....	261
Abb. 8.48: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 5) .....	262
Abb. 8.49: Aufstandsfläche 196/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 6) .....	262
Abb. 8.50: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 7) .....	263



Abb. 8.51: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Winterreifen, Nr. 8) .....	263
Abb. 8.52: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Allwetter, Nr. 9) .....	264
Abb. 8.53: Aufstandsfläche 205/50 R15 (Sommerreifen, Nr. 10) .....	264
Abb. 8.54: Aufstandsfläche 205/50 R15 (Winterreifen, Nr. 11) .....	265
Abb. 8.55: Aufstandsfläche 215/60 R15 (Sommerreifen, Nr. 12) .....	265
Abb. 8.56: Aufstandsfläche 215/60 R15 (Winterreifen, Nr. 13) .....	266
Abb. 8.57: P1_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte .....	273
Abb. 8.58: P1_unversiegelt: Querschnitt in Plattenmitte .....	273
Abb. 8.59: P1_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte .....	274
Abb. 8.60: P1_unversiegelt: Maximale Verschleißtiefe .....	274
Abb. 8.61: P1_versiegelt: Volumenabtrag .....	275
Abb. 8.62: P1_unversiegelt: Volumenabtrag .....	275
Abb. 8.63: P2_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte .....	282
Abb. 8.64: P2_unversiegelt: Querschnitt in Plattenmitte .....	282
Abb. 8.65: P2_versiegelt: Maximale Verschleißtiefe .....	283
Abb. 8.66: P2_unversiegelt: Maximale Verschleißtiefe .....	283
Abb. 8.67: P2_versiegelt: Volumenabtrag .....	284
Abb. 8.68: P2_unversiegelt: Volumenabtrag .....	284
Abb. 8.69: P3_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte .....	290
Abb. 8.70: P3_unversiegelt: Querschnitt in Plattenmitte .....	290
Abb. 8.71: P3_versiegelt: Maximale Verschleißtiefe .....	291
Abb. 8.72: P3_unversiegelt: Maximale Verschleißtiefe .....	291
Abb. 8.73: P3_versiegelt: Volumenabtrag .....	292
Abb. 8.74: P3_unversiegelt: Volumenabtrag .....	292
Abb. 8.75: P1_nass: Querschnitt in Plattenmitte .....	301
Abb. 8.76: P1_trocken: Querschnitt in Plattenmitte .....	301
Abb. 8.77: P1_nass: Maximale Verschleißtiefe .....	302
Abb. 8.78: P1_trocken: Maximale Verschleißtiefe .....	302
Abb. 8.79: P1_nass: Volumenabtrag .....	303
Abb. 8.80: P1_trocken: Volumenabtrag .....	303
Abb. 8.81: P2_nass: Querschnitt in Plattenmitte .....	310

Abb. 8.82: P2_trocken: Querschnitt in Plattenmitte .....	310
Abb. 8.83: P2_nass: Maximale Verschleißtiefe .....	311
Abb. 8.84: P2_trocken: Maximale Verschleißtiefe .....	311
Abb. 8.85: P2_nass: Volumenabtrag .....	312
Abb. 8.86: P2_trocken: Volumenabtrag .....	312
Abb. 8.87: P3_nass: Querschnitt in Plattenmitte .....	319
Abb. 8.88: P3_trocken: Querschnitt in Plattenmitte .....	319
Abb. 8.89: P3_nass: Maximale Verschleißtiefe .....	320
Abb. 8.90: P3_trocken: Maximale Verschleißtiefe .....	320
Abb. 8.91: P3_nass: Volumenabtrag .....	321
Abb. 8.92: P3_trocken: Volumenabtrag .....	321
Abb. 8.93: P4_nass: Querschnitt in Plattenmitte .....	328
Abb. 8.94: P4_trocken: Querschnitt in Plattenmitte .....	328
Abb. 8.95: P4_nass: Maximale Verschleißtiefe .....	329
Abb. 8.96: P4_trocken: Maximale Verschleißtiefe .....	329
Abb. 8.97: P4_nass: Volumenabtrag .....	330
Abb. 8.98: P4_trocken: Volumenabtrag .....	330
Abb. 8.99: P5_nass: Querschnitt in Plattenmitte .....	337
Abb. 8.100: P5_trocken: Querschnitt in Plattenmitte .....	337
Abb. 8.101: P5_nass: Maximale Verschleißtiefe .....	338
Abb. 8.102: P5_trocken: Maximale Verschleißtiefe .....	338
Abb. 8.103: P5_nass: Volumenabtrag .....	339
Abb. 8.104: P5_trocken: Volumenabtrag .....	339
Abb. 8.105: P1_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	346
Abb. 8.106: P1_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	346
Abb. 8.107: P1_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	347
Abb. 8.108: P1_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	347
Abb. 8.109: P1_ohne Splitt: Volumenabtrag .....	348
Abb. 8.110: P1_mit Splitt: Volumenabtrag .....	348
Abb. 8.111: P2_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	355
Abb. 8.112: P2_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	355

Abb. 8.113:	P2_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	356
Abb. 8.114:	P2_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	356
Abb. 8.115:	P2_ohne Splitt: Volumenabtrag.....	357
Abb. 8.116:	P2_mit Splitt: Volumenabtrag .....	357
Abb. 8.117:	P3_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	364
Abb. 8.118:	P2_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	364
Abb. 8.119:	P3_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	365
Abb. 8.120:	P3_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	365
Abb. 8.121:	P3_ohne Splitt: Volumenabtrag.....	366
Abb. 8.122:	P3_mit Splitt: Volumenabtrag .....	366
Abb. 8.123:	P4_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	372
Abb. 8.124:	P4_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte .....	372
Abb. 8.125:	P4_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	373
Abb. 8.126:	P4_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe .....	373
Abb. 8.127:	P4_ohne Splitt: Volumenabtrag.....	374
Abb. 8.128:	P4_mit Splitt: Volumenabtrag .....	374

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Gegenüberstellung der befahrbaren Beschichtungssysteme OS 8, OS 11a, OS 11b, OS 13 und OS 14 nach ([DAfStb - 2001], [DAfStb - 2016])	18
Tab. 2.2:	Ausführungsvarianten für Parkdecks nach [DBV - 2018]	24
Tab. 2.3:	Einteilung und grundlegende Eigenschaften von Kunststoffen aus [Bargel - 2005] und [Domininghaus et al. - 2008]	26
Tab. 2.4:	Füllstoffe für polymere Werkstoffe zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens aus [Czichos u. Habig - 2015]	30
Tab. 2.5:	Beispiele von Ausführungsvarianten von chloridbelasteten Neubauteilen <sup>1)</sup> aus [DBV - 2018]	35
Tab. 2.6:	Aufgaben der Planung – Einwirkungen aus der Nutzung aus [Flohrer - 2018]	37
Tab. 3.1:	Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung des Lastfalls PKW auf Oberflächenschutzsystem	46
Tab. 3.2:	Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer drehenden, rollenden Beanspruchung	54
Tab. 3.3:	Gegenüberstellung und tribologische Untersuchung der Prüfverfahren mit einer stehenden, rollenden Beanspruchung	66
Tab. 4.1:	Anforderungen an die Oberflächenzugfestigkeit der Betongrundkörper vor Applikation eines Oberflächenschutzsystems nach [DAfStb - 2001] bzw. [DAfStb - 2016]	75
Tab. 4.2:	Fotodokumentation der Applikation der Beschichtung am Beispiel eines OS 11a-Systems	76
Tab. 5.1:	Klassifizierung der Oberflächen durch visuelle Begutachtung nach der Verschleißbeanspruchung ([Ladner et al. - 2013a], [Ladner et al. - 2013b], [Breit et al. - 2015a])	81
Tab. 5.2:	Maximal zulässige Verschleißtiefe je Systemaufbau bis Verschleißklasse 4 bezogen auf die Mindestschichtdicke	82
Tab. 5.3:	Begrenzungen zur Ermittlung von Einzelschichtdicken von Oberflächenschutzschichten an Bohrkernproben	85
Tab. 5.4:	P1_PAT: Laserauswertung 2D bzw. 3D	93
Tab. 5.5:	P1_PAT: Fotografische Auswertung	94
Tab. 5.6:	Vergleich der verschiedenen Prüfverfahren zur Schichtdickenmessung über die Abtragstiefen an einem mit dem Parking Abrasion Test geprüften OS 11b-System	96
Tab. 6.1:	Probekörper für den Vergleich BCA- / PAT-Verfahren	99

Tab. 6.2: Verschleißkategorien der geprüften OS-Systeme nach 15.000 Zyklen geprüft mit PAT- und BCA-Verfahren	100
Tab. 6.3: Überblick der Prüfstände der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK – Parking Abrasion Test) und der Sika Deutschland GmbH (Bänziger Rad) aus [Ladner et al. - 2018]	104
Tab. 6.4: Untersuchte Reifengrößen hinsichtlich des Einflusses auf die Temperaturentwicklung während der PAT-Prüfung	108
Tab. 6.5: Maximaltemperaturen bei den geprüften Reifen (Fühler 3) sowie zugehörige Aufstandsfläche	113
Tab. 6.6: Probekörper Vergleich mit / ohne Deckversiegelung	115
Tab. 6.7: Schichtdicken und Abtragstiefen mit / ohne Deckversiegelung nach 15.000 Zyklen	118
Tab. 6.8: Verschleißkategorie mit / ohne Deckversiegelung nach 15.000 Zyklen	118
Tab. 6.9: Abtragstiefen und Volumenabtrag mit / ohne Deckversiegelung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl	120
Tab. 6.10: Übersicht Probekörper Zugversuche Einzelkomponenten	122
Tab. 6.11: Übersicht Probekörper Zugversuche im System	122
Tab. 6.12: Dehnungsbereiche der Zugversuche	124
Tab. 6.13: Probekörper Vergleich nass / trocken	131
Tab. 6.14: Schichtdicken und Abtragstiefen nach nass und trockener Lagerung nach 15.000 Zyklen	134
Tab. 6.15: Verschleißkategorie nach nass und trockener Lagerung nach 15.000 Zyklen	134
Tab. 6.16: Abtragstiefen und Volumenabtrag mit / ohne Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl	137
Tab. 6.17: Ermittlung der Splittmenge für die zusätzliche Beanspruchung mit Splitt beim Parking Abrasion Test	139
Tab. 6.18: Probekörper Vergleich mit / ohne Splittbeanspruchung	140
Tab. 6.19: Schichtdicken und Abtragstiefen mit / ohne Splitt-Beanspruchung nach 5.000 Zyklen	142
Tab. 6.20: Verschleißkategorie mit / ohne Splitt-Beanspruchung nach 5.000 Zyklen	142
Tab. 6.21: Abtragstiefen und Volumenabtrag mit / ohne Splitt in Abhängigkeit der Zyklenanzahl	143
Tab. 6.22: Gegenüberstellung der Probekörper zur Bestimmung Shore-Härte an OS 11a- und OS 10-Einzelkomponenten	145

Tab. 6.23: Haftzugfestigkeiten und Versagensarten nach [DIN EN 1542] an belasteten und unbelasteten Bereichen mit dem Parking Abrasion Test	154
Tab. 8.1: Grundlage Hertz'sche Flächenpressung	192
Tab. 8.2: Frischbetonkennwerte	192
Tab. 8.3: Mischungsberechnung Betongrundkörper	193
Tab. 8.4: Frischbetonkennwerte	194
Tab. 8.5: Oberflächenzugfestigkeiten	195
Tab. 8.6: P1_PAT: Laserauswertung Draufsicht	198
Tab. 8.7: P1_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht	199
Tab. 8.8: P1_BCA: Laserauswertung Draufsicht	200
Tab. 8.9: P1_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht	201
Tab. 8.10: P1_PAT: Fotografische Auswertung	202
Tab. 8.11: P1_BCA: Fotografische Auswertung	203
Tab. 8.12: P2_PAT: Laserauswertung Draufsicht	207
Tab. 8.13: P2_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht	208
Tab. 8.14: P2_BCA: Laserauswertung Draufsicht	209
Tab. 8.15: P2_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht	210
Tab. 8.16: P2_PAT: Fotografische Auswertung	211
Tab. 8.17: P2_BCA: Fotografische Auswertung	212
Tab. 8.18: P3_PAT: Laserauswertung Draufsicht	216
Tab. 8.19: P3_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht	217
Tab. 8.20: P3_BCA: Laserauswertung Draufsicht	218
Tab. 8.21: P3_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht	219
Tab. 8.22: P3_PAT: Fotografische Auswertung	220
Tab. 8.23: P3_BCA: Fotografische Auswertung	221
Tab. 8.24: P4_PAT: Laserauswertung Draufsicht	225
Tab. 8.25: P4_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht	226
Tab. 8.26: P4_BCA: Laserauswertung Draufsicht	227
Tab. 8.27: P4_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht	228
Tab. 8.28: P4_PAT: Fotografische Auswertung	229
Tab. 8.29: P4_BCA: Fotografische Auswertung	230
Tab. 8.30: P5_PAT: Laserauswertung Draufsicht	234

Tab. 8.31: P5_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht	235
Tab. 8.32: P5_BCA: Laserauswertung Draufsicht	236
Tab. 8.33: P5_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht	237
Tab. 8.34: P5_PAT: Fotografische Auswertung	238
Tab. 8.35: P5_BCA: Fotografische Auswertung	238
Tab. 8.36: P6_PAT: Laserauswertung Draufsicht	242
Tab. 8.37: P6_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht	243
Tab. 8.38: P6_BCA: Laserauswertung Draufsicht	244
Tab. 8.39: P6_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht	245
Tab. 8.40: P6_PAT: Fotografische Auswertung	246
Tab. 8.41: P6_BCA: Fotografische Auswertung	247
Tab. 8.42: P7_PAT: Laserauswertung Draufsicht	251
Tab. 8.43: P7_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht	252
Tab. 8.44: P7_BCA: Laserauswertung Draufsicht	253
Tab. 8.45: P7_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht	254
Tab. 8.46: P7_PAT: Fotografische Auswertung	255
Tab. 8.47: P7_BCA: Fotografische Auswertung	256
Tab. 8.48: P1_versiegelt: Laserauswertung Draufsicht	267
Tab. 8.49: P1_versiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht	268
Tab. 8.50: P1_unversiegelt: Laserauswertung Draufsicht	269
Tab. 8.51: P1_unversiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht	270
Tab. 8.52: P1_unversiegelt: Fotografische Auswertung	271
Tab. 8.53: P1_versiegelt: Fotografische Auswertung	272
Tab. 8.54: P2_versiegelt: Laserauswertung Draufsicht	276
Tab. 8.55: P2_versiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht	277
Tab. 8.56: P2_unversiegelt: Laserauswertung Draufsicht	278
Tab. 8.57: P2_unversiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht	279
Tab. 8.58: P2_unversiegelt: Fotografische Auswertung	280
Tab. 8.59: P2_versiegelt: Fotografische Auswertung	281
Tab. 8.60: P3_versiegelt: Laserauswertung Draufsicht	285
Tab. 8.61: P3_versiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht	286

## Tabellenverzeichnis

---

Tab. 8.62: P3_unversiegelt: Laserauswertung Draufsicht	287
Tab. 8.63: P3_unversiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht	288
Tab. 8.64: P3_unversiegelt: Fotografische Auswertung	289
Tab. 8.65: P3_versiegelt: Fotografische Auswertung	289
Tab. 8.66: Ergebnisse Zugmodule in N/mm <sup>2</sup> der Einzelkomponenten	293
Tab. 8.67: Ergebnisse Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> der Einzelkomponenten	293
Tab. 8.68: Ergebnisse Zugmodul in N/mm <sup>2</sup> im System	294
Tab. 8.69: Ergebnisse Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> im System	294
Tab. 8.70: P1_nass: Laserauswertung Draufsicht	295
Tab. 8.71: P1_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht	296
Tab. 8.72: P1_trocken: Laserauswertung Draufsicht	297
Tab. 8.73: P1_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht	298
Tab. 8.74: P1_nass: Fotografische Auswertung	299
Tab. 8.75: P1_trocken: Fotografische Auswertung	300
Tab. 8.76: P2_nass: Laserauswertung Draufsicht	304
Tab. 8.77: P2_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht	305
Tab. 8.78: P2_trocken: Laserauswertung Draufsicht	306
Tab. 8.79: P2_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht	307
Tab. 8.80: P2_nass: Fotografische Auswertung	308
Tab. 8.81: P2_trocken: Fotografische Auswertung	309
Tab. 8.82: P3_nass: Laserauswertung Draufsicht	313
Tab. 8.83: P3_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht	314
Tab. 8.84: P3_trocken: Laserauswertung Draufsicht	315
Tab. 8.85: P3_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht	316
Tab. 8.86: P3_nass: Fotografische Auswertung	317
Tab. 8.87: P3_trocken: Fotografische Auswertung	318
Tab. 8.88: P4_nass: Laserauswertung Draufsicht	322
Tab. 8.89: P4_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht	323
Tab. 8.90: P4_trocken: Laserauswertung Draufsicht	324
Tab. 8.91: P4_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht	325
Tab. 8.92: P4_nass: Fotografische Auswertung	326



Tab. 8.93: P4_trocken: Fotografische Auswertung	327
Tab. 8.94: P5_nass: Laserauswertung Draufsicht	331
Tab. 8.95: P5_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht	332
Tab. 8.96: P5_trocken: Laserauswertung Draufsicht	333
Tab. 8.97: P5_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht	334
Tab. 8.98: P5_nass: Fotografische Auswertung	335
Tab. 8.99: P5_trocken: Fotografische Auswertung	336
Tab. 8.100: P1_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht	340
Tab. 8.101: P1_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	341
Tab. 8.102: P1_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht	342
Tab. 8.103: P1_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	343
Tab. 8.104: P1_ohne Splitt: Fotografische Auswertung	344
Tab. 8.105: P1_mit Splitt: Fotografische Auswertung	345
Tab. 8.106: P2_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht	349
Tab. 8.107: P2_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	350
Tab. 8.108: P2_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht	351
Tab. 8.109: P2_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	352
Tab. 8.110: P2_ohne Splitt: Fotografische Auswertung	353
Tab. 8.111: P2_mit Splitt: Fotografische Auswertung	354
Tab. 8.112: P3_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht	358
Tab. 8.113: P3_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	359
Tab. 8.114: P3_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht	360
Tab. 8.115: P3_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	361
Tab. 8.116: P3_ohne Splitt: Fotografische Auswertung	362
Tab. 8.117: P3_mit Splitt: Fotografische Auswertung	363
Tab. 8.118: P4_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht	367
Tab. 8.119: P4_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	368
Tab. 8.120: P4_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht	369
Tab. 8.121: P4_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht	370
Tab. 8.122: P4_ohne Splitt: Fotografische Auswertung	370
Tab. 8.123: P4_mit Splitt: Fotografische Auswertung	371

## Anhang A

Tab. 8.1: Grundlage Hertz'sche Flächenpressung

	E-Modul Prüfrad [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul OS- System [N/mm <sup>2</sup> ]	v Prüfrad	v OS- System (geschätzt)	F (Auflast) [N]	Radius [mm]	Länge [mm]
BCA	210.000	3.000	0,2	0,3	216,66	76	20
RWA	210.000		0,2		2.000	125	40
Taber	5		0,5		4,9	51,6	12,7
PAT	5		0,5		4.500	323	170
DAT	5		0,5		4.000	323	170
Bottrop	3.100		0,5		5.000	200	100
ARTe	5		0,5		1.000	323	170
Straßen- markie- rung	5		0,5		3.000	323	170

Tab. 8.2: Frischbetonkennwerte

Charge	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Ausbreitmaß [mm]	Konsistenz- klasse	LP-Gehalt
Charge 1	2,36	340	F1	2,15
Charge 2*	2,35	520	F4	2,70
Charge 3*	2,38	350	F2	1,80
Charge 4*	2,36	440	F3	1,80
* Höhere Dosierung an Fließmittel gegenüber Charge 1				

Tab. 8.3: Mischungsberechnung Betongrundkörper

LAFARGE		Mischungsberechnungs- Protokoll		Werk/Baustelle: Bauwerk/Bauteil: OS Parkhaus Ersteller/Bearbeiter: Ladner	
Eingetragen am: Donnerstag, 15. März 2012, 12:58:23 Uhr Bitte beachten Sie den Hinweis zum Haftungsausschluss unter Hilfe im Programm oder im Impressum von www.lafarge.de					
<b>Anforderungen</b>					
Expositions- klassen:	XC3; XD3; XF4	Festigkeits- klasse:	C 40/50	Feuchtigkeits- klasse:	WO
max. w/z bzw. w/z <sub>eq</sub>	0,45	min. Zement- gehalt:	320 kg/m³	Vorhaltemaß:	6 N/mm²
Prüftermin:	28 Tage	min. Zement- gehalt:	(bei Anrechnung von Zusatzstoffen) 320 kg/m³	Unterwasser- beton:	nein
				WU-Beton:	nein
				Größtkorn:	16 mm
				Sieblinien- bereich:	A/B
				k-Wert:	4,08
<b>Ausgangsstoffe</b>					
Zement:	CEM I 42,5 R Karsdorf	Gesteins- körnig:	Rheinsand 0/2, 02.11.2010 (2,6) Rheinkies 2/8, 02.11., 2010 (2,6) Rheinkies 8/16, 02.11.2010 (2,6)		
Zusatz- mittel:		Recycling- wasser- gehalt:	0,0 kg/m³	Recycling- wasser- dichte:	1,00 kg/dm³
Zusatz- stoffe:		Gesamt- wasser:	170,4 kg/m³	Luftporen- gehalt:	1,5 Vol.-%
<b>Stoffraumrechnung</b>					
Zieldruck- festigkeit:	$f_{ck,cube} \geq f_{ck} + 6 \text{ N/mm}^2 = 56 \text{ N/mm}^2$	w/z-Wert (Festigkeit)	$\leq 0,36$	w/z-Wert (Expositionsklasse)	$\leq 0,45$
		Gewählter w/z-Wert, $w/(z + k_1 f + k_2 s)$ , ( $k_1 = 0,4$ ; $k_2 = 1,0$ ) (bei Unterwasserbeton $k_1 = 0,7$ ; $k_2 = 1,0$ )	0,45		
			Dichte kg/dm³	Stoffraum dm³/m³	
Frischwassergehalt, $w_{frisch}$		kg/m³	170,42	: 1,00 -->	170,42
Recyclingwassergehalt, $w_{recycl}$		kg/m³	0,00	: 1,00 -->	0,00
Zementgehalt, $z$		kg/m³	375,00	: 3,12 -->	120,19
Zusatzmittel		kg/m³			
Zusatzmittel		kg/m³			
Zusatzmittel		kg/m³			
Zusatzstoffe		kg/m³			
Zusatzstoffe		kg/m³			
Zusatzstoffe		kg/m³			
Luftporengehalt, $p$		Vol.-%	1,52	x 10 -->	15,16
Erforderliche Gesteinskörnig., $g$		kg/m³	1805,00	<- 2,60 x	694,23
Zusammensetzung für 1 m³			Zusammensetzung für 0,600 m³		
	Anteil	Stoffraum	Kornroh- dichte	trocken	Oberflächenfeuchte
	Vol.-%	dm³/m³	kg/dm³	kg/m³	kg
Gesteinskörnig.					
Rheinsand 0/2	34,9	242,1	2,60	629,37	377,621
Rheinkies 2/8	34,9	242,0	2,60	629,24	377,546
Rheinkies 8/16	30,3	210,1	2,60	546,38	327,830
Summe	100,0	694,2		1805,00	1082,997
Zement	CEM I 42,5 R Karsdorf			375,00	225,000
Zusatzmittel					
Zusatzmittel					
Zusatzmittel					
Frischwasser				170,42	102,251
Recyclingw.				0,00	0,000
Zusatzstoff					
Zusatzstoff					
Zusatzstoff					
Sollwert Frischbetonmasse				2350,41	1410,248
Mehlkorngehalt in kg/m³: 375,0 Zement + 6,3 Gesteinskörnig. < 0,125 mm + 0,0 Zusatzstoff + 0,0 Feststoffe Recyclingw. = 381,3 Mehlkorn- und Feinstsandgehalt in kg/m³: 375,0 Zement + 100,7 Gesteinskörnig. < 0,25 mm + 0,0 Zusatzstoff + 0,0 Feststoffe Recyclingw. = 475,7 Mörtelgehalt in dm³/m³: 170,4 Wasser + 0,0 Recyclingw. + 120,2 Zement + 0,0 Zusatzstoff + 15,2 Luftporengehalt + 227,5 Sand 0/2 mm = 533,3					

Tab. 8.4: Frischbetonkennwerte

Charge	Probe- körper- geometrie	Prüfalter [d]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Druck- festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]
Charge 1	Würfel	7	2,36	54,8	54,9
			2,36	56,2	
			2,35	53,7	
		28	2,36	62,4	63,9
			2,36	63,7	
			2,36	65,7	
	Zylinder	28	2,37	55,0	56,1
			2,37	56,5	
			2,37	56,7	
Charge 2	Würfel	7	2,35	51,3	51,0
			2,35	51,0	
			2,33	50,8	
		28	2,34	58,2	59,8
			2,38	63,9	
			2,33	57,3	
	Zylinder	28	2,35	55,0	54,4
			2,35	54,2	
			2,36	54,1	
Charge 3	Würfel	7	2,37	58,0	58,7
			2,36	59,1	
			2,36	59,1	
		28	2,38	68,0	66,0
			2,37	67,9	
			2,37	62,2	
	Zylinder	28	2,41	62,6	61,5
			2,40	60,5	
			2,40	61,5	
Charge 4	Würfel	7	2,32	53,8	53,1
			2,31	52,1	
			2,30	53,4	
		28	2,33	63,1	62,0
			2,32	61,1	
			2,34	61,9	
	Zylinder	28	2,33	55,4	54,4
			2,33	52,8	
			2,34	55,1	

Tab. 8.5: Oberflächenzugfestigkeiten

Charge	Haftzugfestigkeit [N/mm²]	Mittelwert [N/mm²]	Versagensart
Charge 1	3,91	4,08	A
	4,67		A
	3,65		A
Charge 2	2,92	4,15	A
	4,39		A
	5,13		A
Charge 3	5,21	5,14	A
	5,49		A
	4,72		A
Charge 4	3,62	3,25	A
	3,80		A
	2,34		A
A: Kohäsionsbruch im Betonuntergrund			

## Anhang B

Schrittweise Anleitung für die Laserauswertung mit dem 2D/3D-Laser, jeweils nach 0, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, 7.500, 10.000, 12.500 und 15.000 Zyklen:

- 1.) Fotografieren der Prüfstelle
- 2.) Laseraufnahme der Prüfstelle
  - Aufzeichnen von x- und z-Koordinaten  
(x-Koordinate: Tiefenmessung, z-Koordinate: Abstand der Messpunkte)
  - Ausgabe der Ergebnisse als csv-Datei
  - y-Koordinate ergibt sich aus der Distanz der Prüfstrecke
- 3.) Einlesen der csv-Dateien in Matlab und Entfernen der Fehlmeßstellen im Randbereich, gekennzeichnet durch „-999“
- 4.) Ausgleich der Schiefstellung in x- und y-Richtung
  - Betrachtung von 50 x 50 Messstellen im unbelasteten Randbereich  
(identisch bei allen Probekörpern)
  - Ermittlung der durchschnittlichen Höhe und Vergleich der Höhendifferenzen
  - Bei Bedarf Überlagerung mit einer linearen Steigungsmatrix in x- und y-Richtung

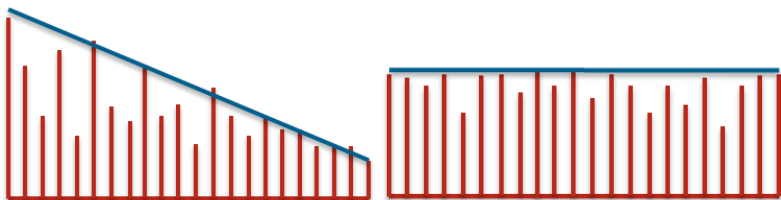


Abb. 8.1: Schematische Darstellung des Ausgleichs der Schiefstellung: Links vor Ausgleich der Schiefstellung, rechts nach Ausgleich der Schiefstellung

- 5.) Erstellen von 2D- und 3D-Bildern nach dem jeweiligen Zyklus
- 6.) Bestimmung der maximalen Verschleißtiefe
  - Optisch am stärksten verschlissene Stelle wird manuell ausgewählt
  - Ermittlung der Differenz zur Ursprungsmesspunkt und jeweiligem Zyklus
- 7.) Bestimmung des Tiefenabtrags am Querschnitt in Plattenmitte
  - Ermittlung der Differenz zur Ursprungsmesspunkt und jeweiligem Zyklus in Querschnittmitte ohne Berücksichtigung, ob an dieser Stelle der maximale Verschleiß vorliegt

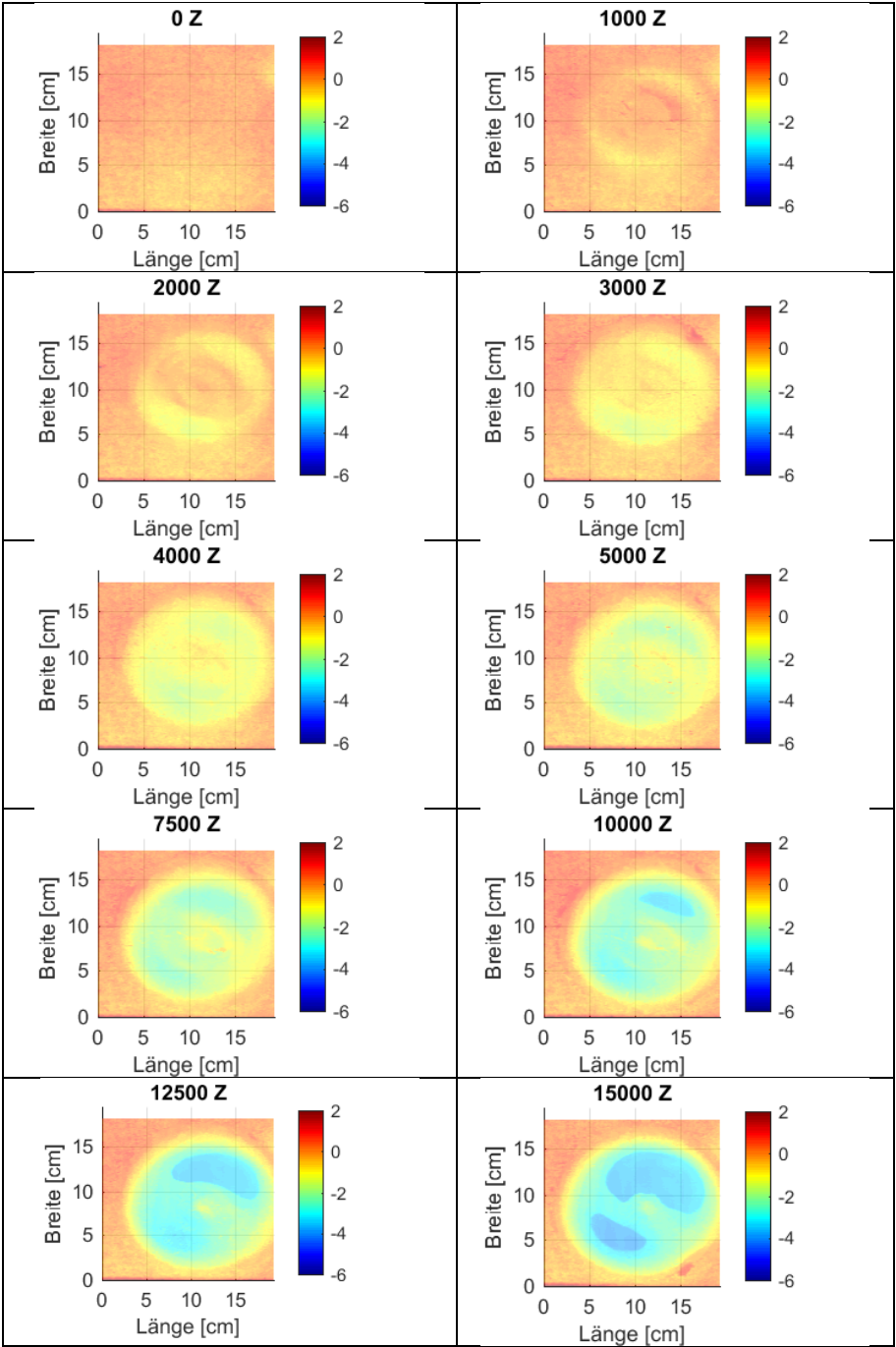
8.) Bestimmung des Volumenabtrags

→ Berechnung des Volumenabtrags jeweils nach 5.000, 10.000 und 15.000 Zyklen im Vergleich zur Ursprungsfläche

→ Berechnung des Volumens aus den Differenzen beim Tiefenabtrag über die Fläche

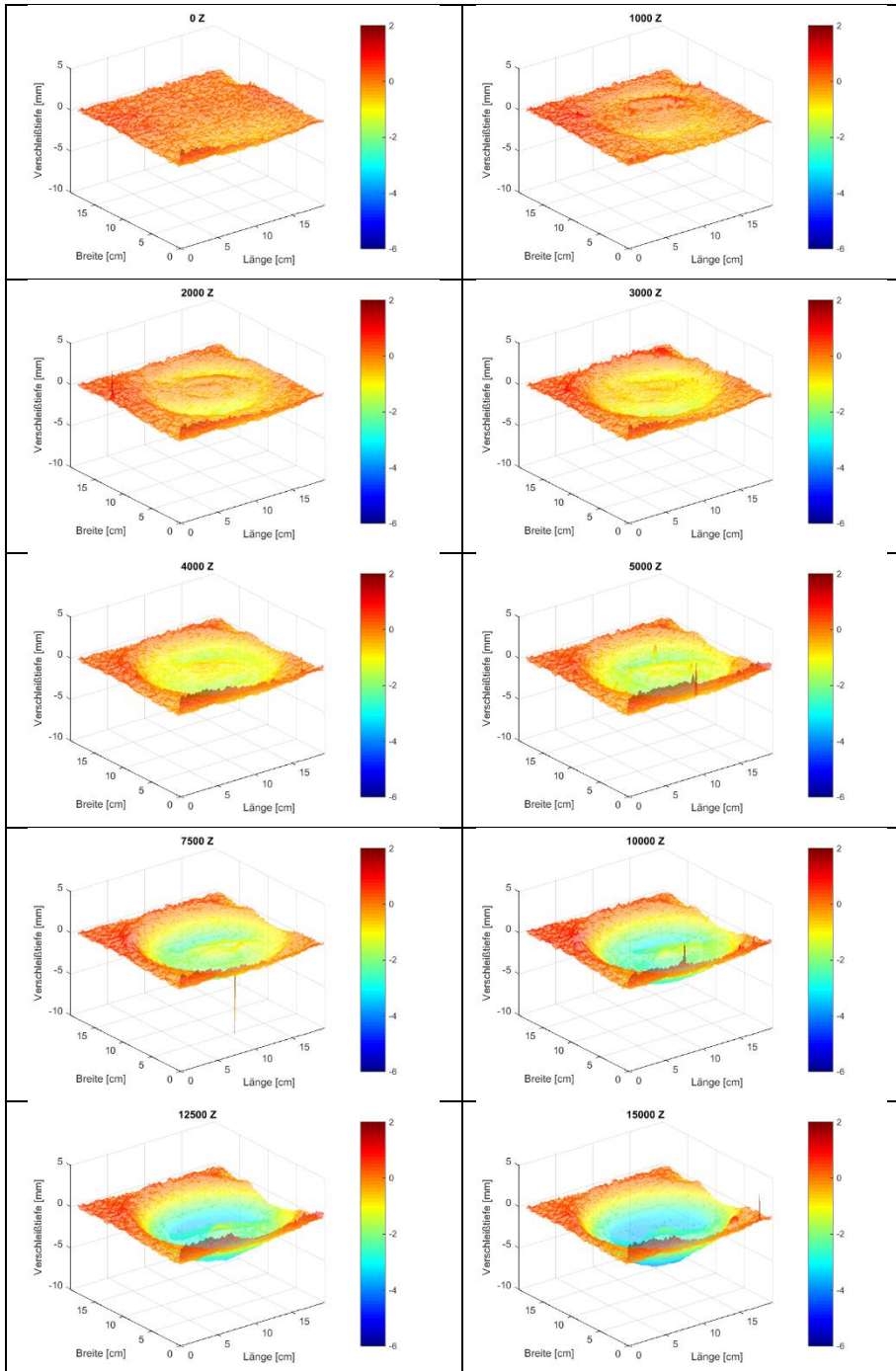
Anhang C

Tab. 8.6: P1\_PAT: Laserauswertung Draufsicht

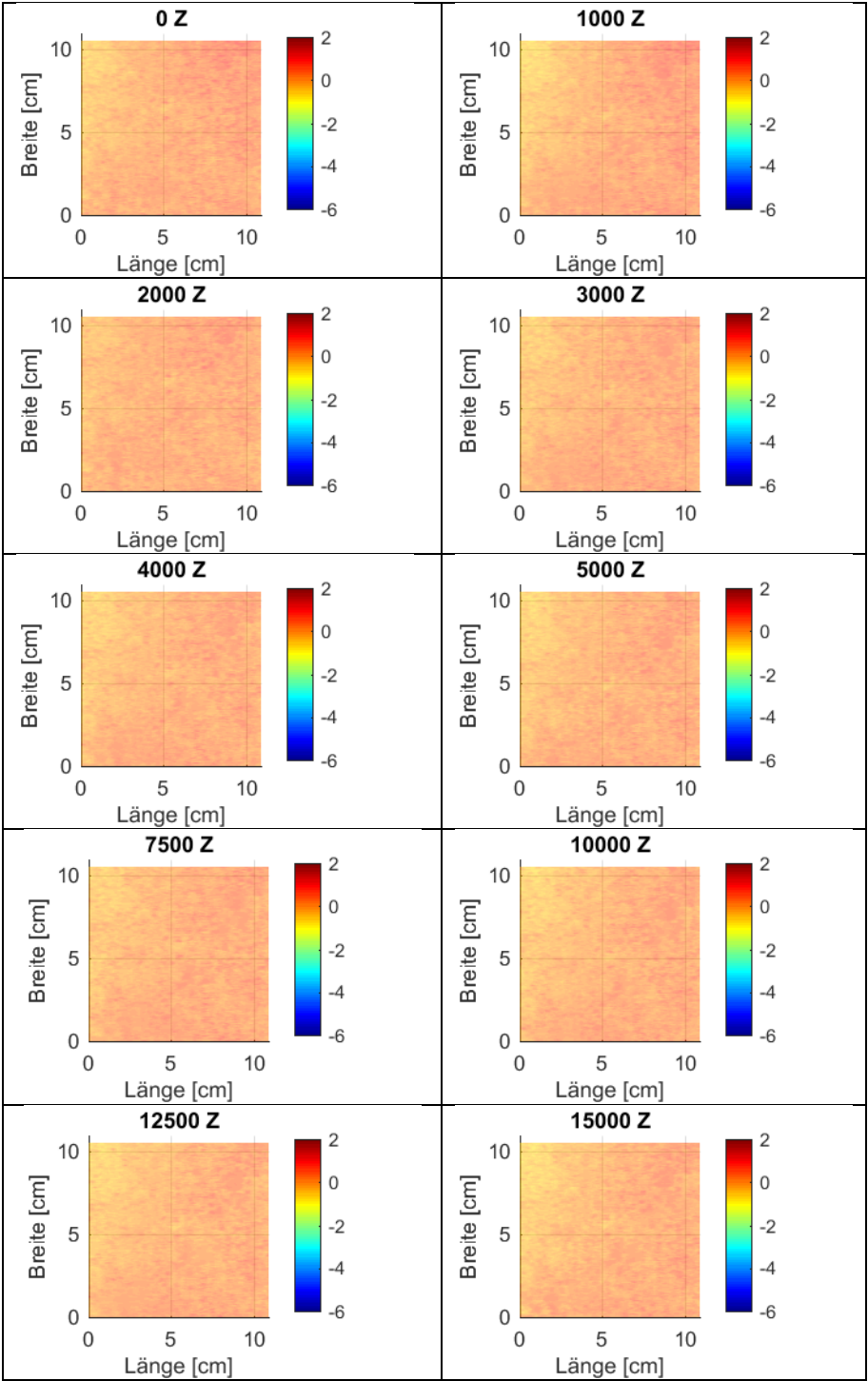




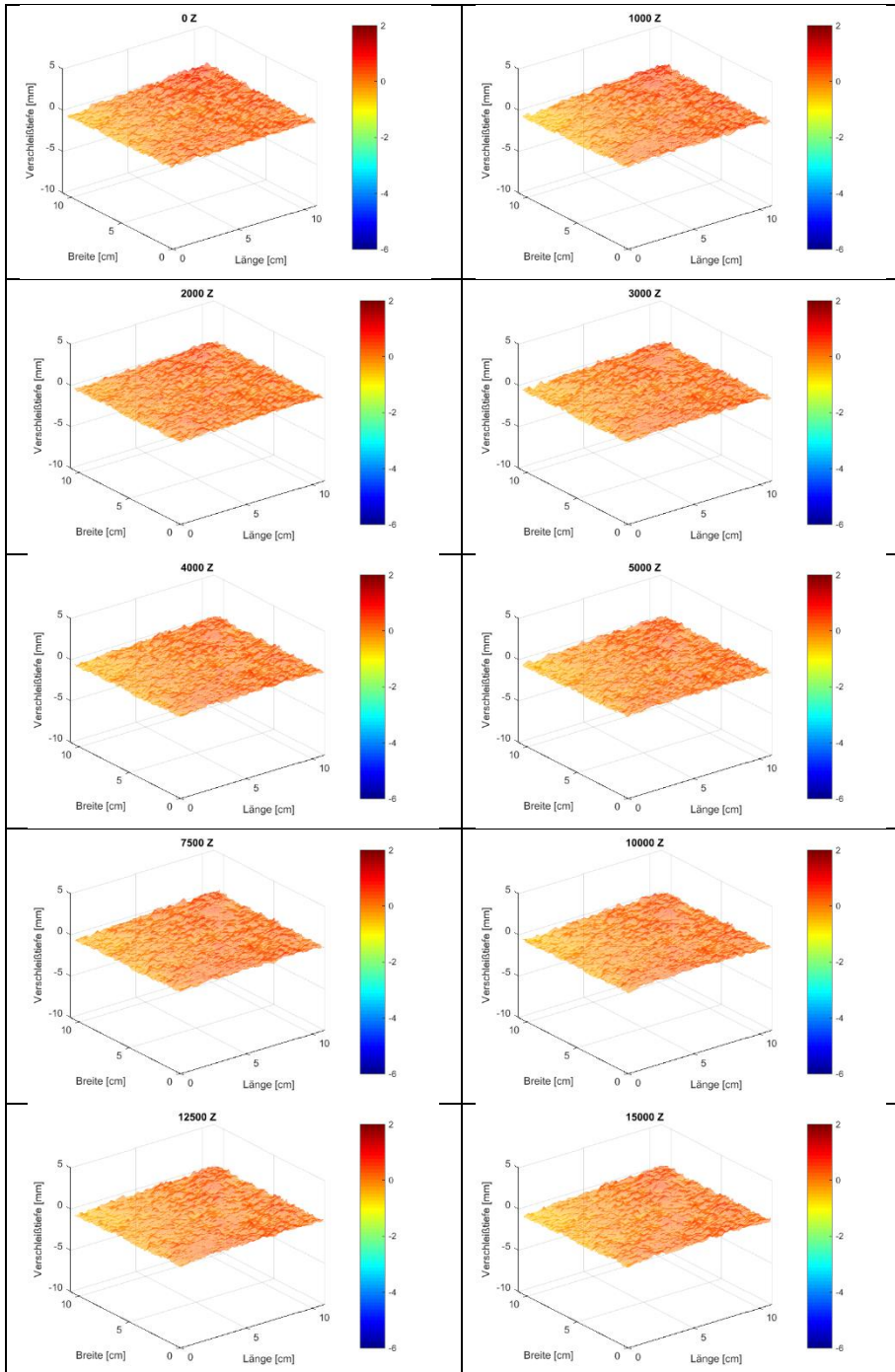
Tab. 8.7: P1\_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht




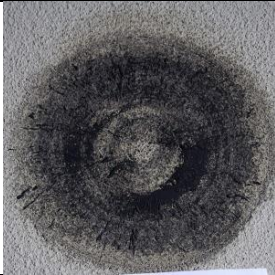


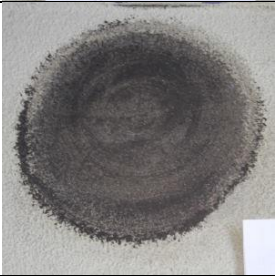

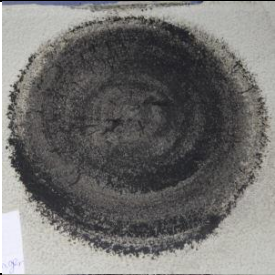



Tab. 8.8: P1\_BCA: Laserauswertung Draufsicht





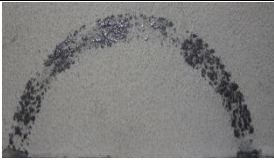

Tab. 8.9: P1\_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.10: P1\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z				1.000 Z
2.000 Z				3.000 Z
4.000 Z				5.000 Z
7.500 Z				10.000 Z
12.500 Z				15.000 Z

Tab. 8.11: P1\_BCA: Fotografische Auswertung

0 Z				5.000 Z
10.000 Z				15.000 Z

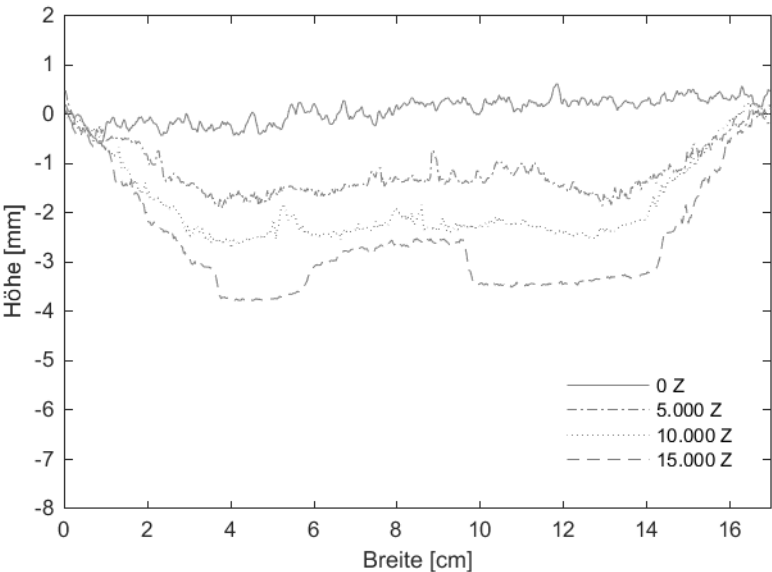


Abb. 8.2: P1\_PAT: Querschnitt in Plattenmitte

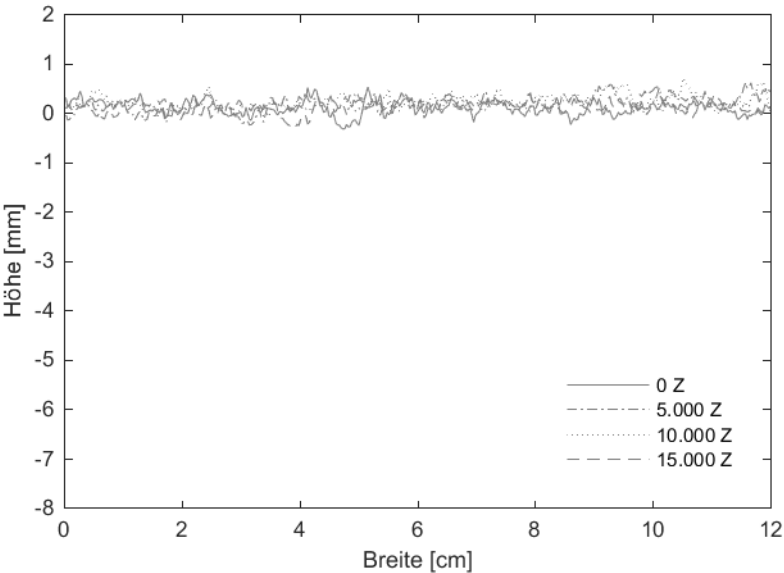


Abb. 8.3: P1\_BCA: Querschnitt in Plattenmitte

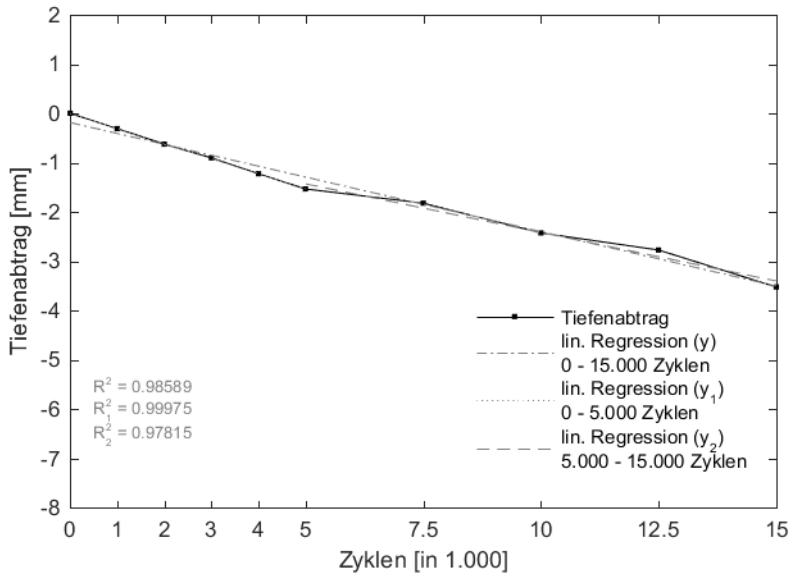


Abb. 8.4: P1\_PAT: Maximale Verschleißtiefe

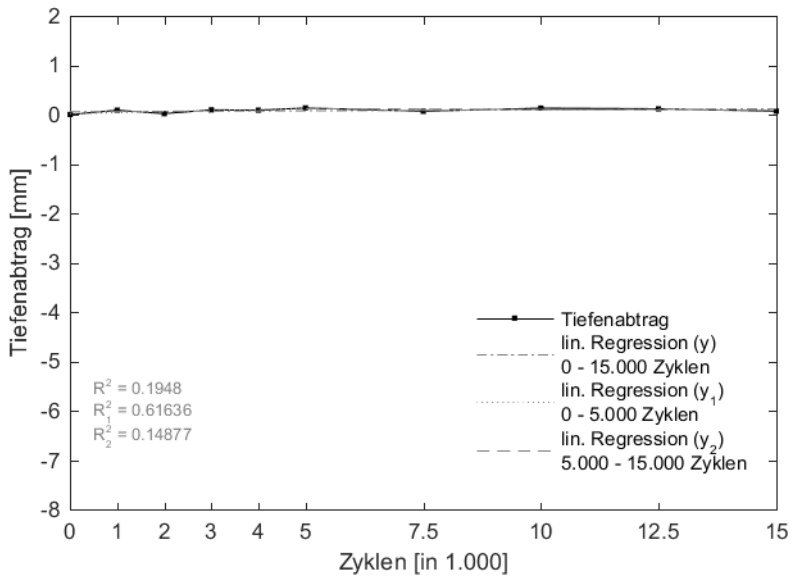


Abb. 8.5: P1\_BCA: Maximale Verschleißtiefe

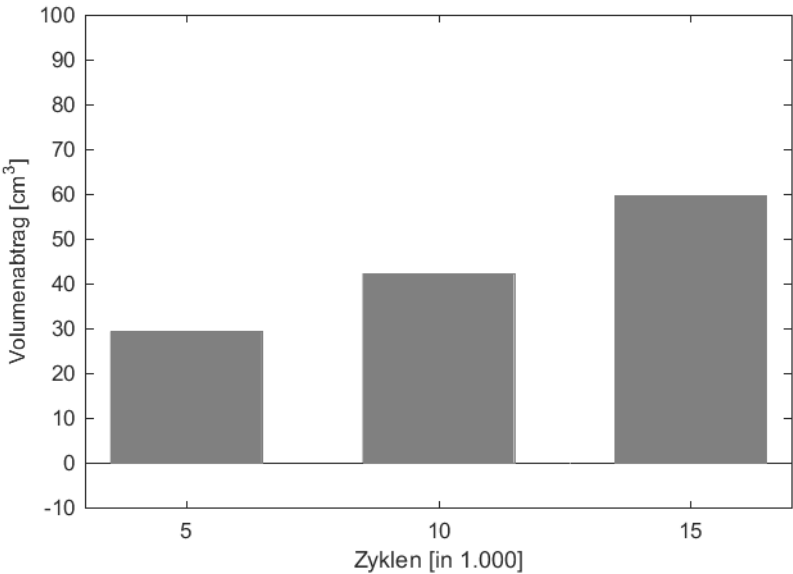


Abb. 8.6: P1\_PAT: Volumenabtrag

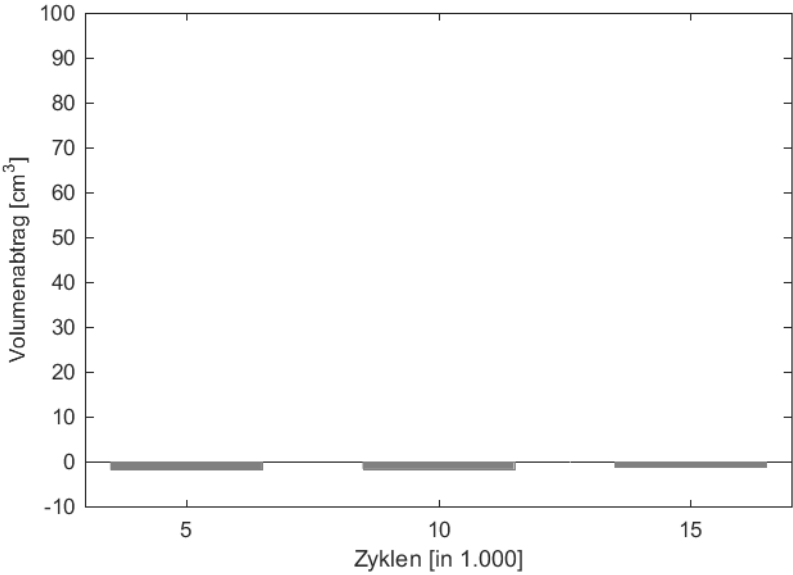
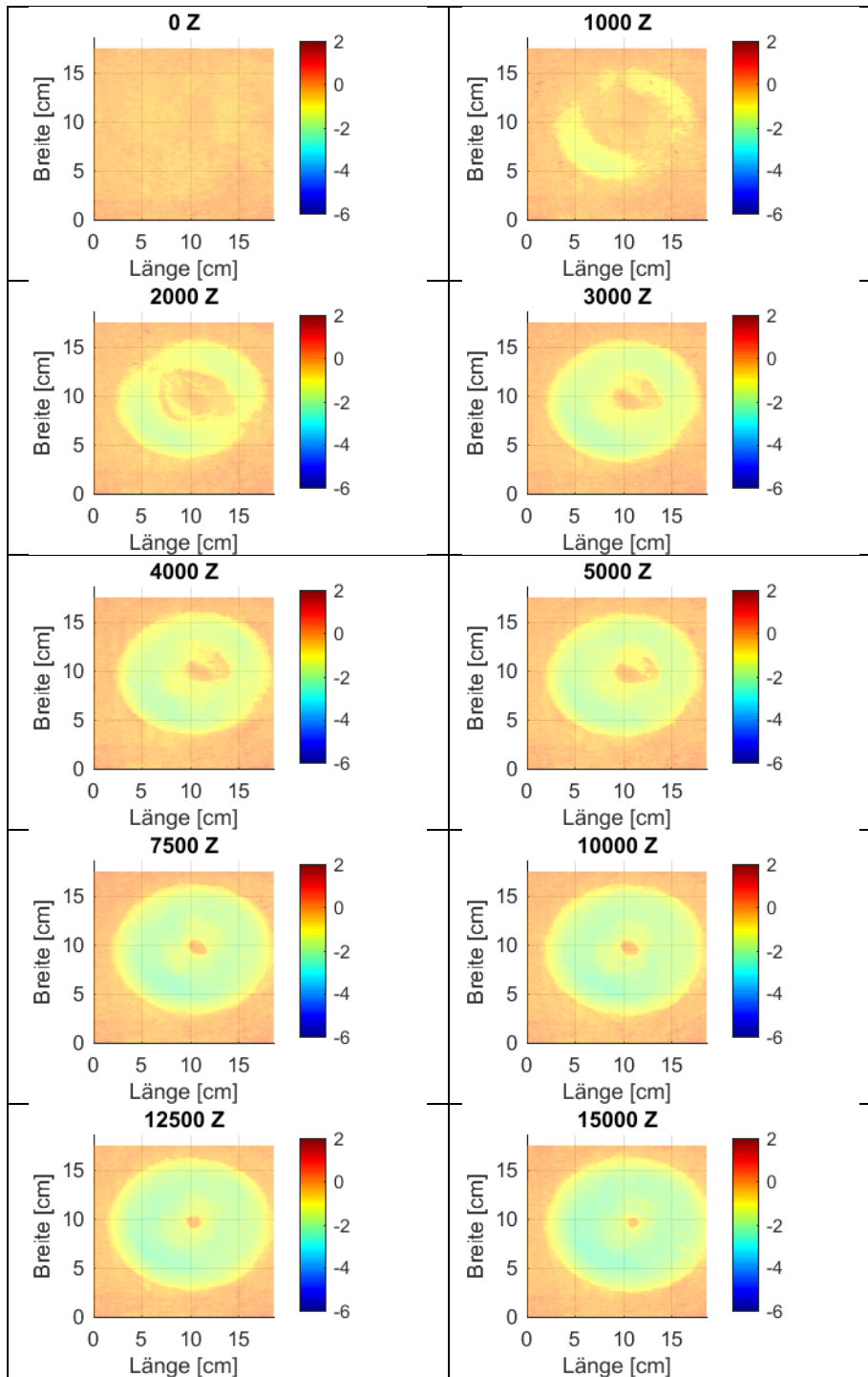


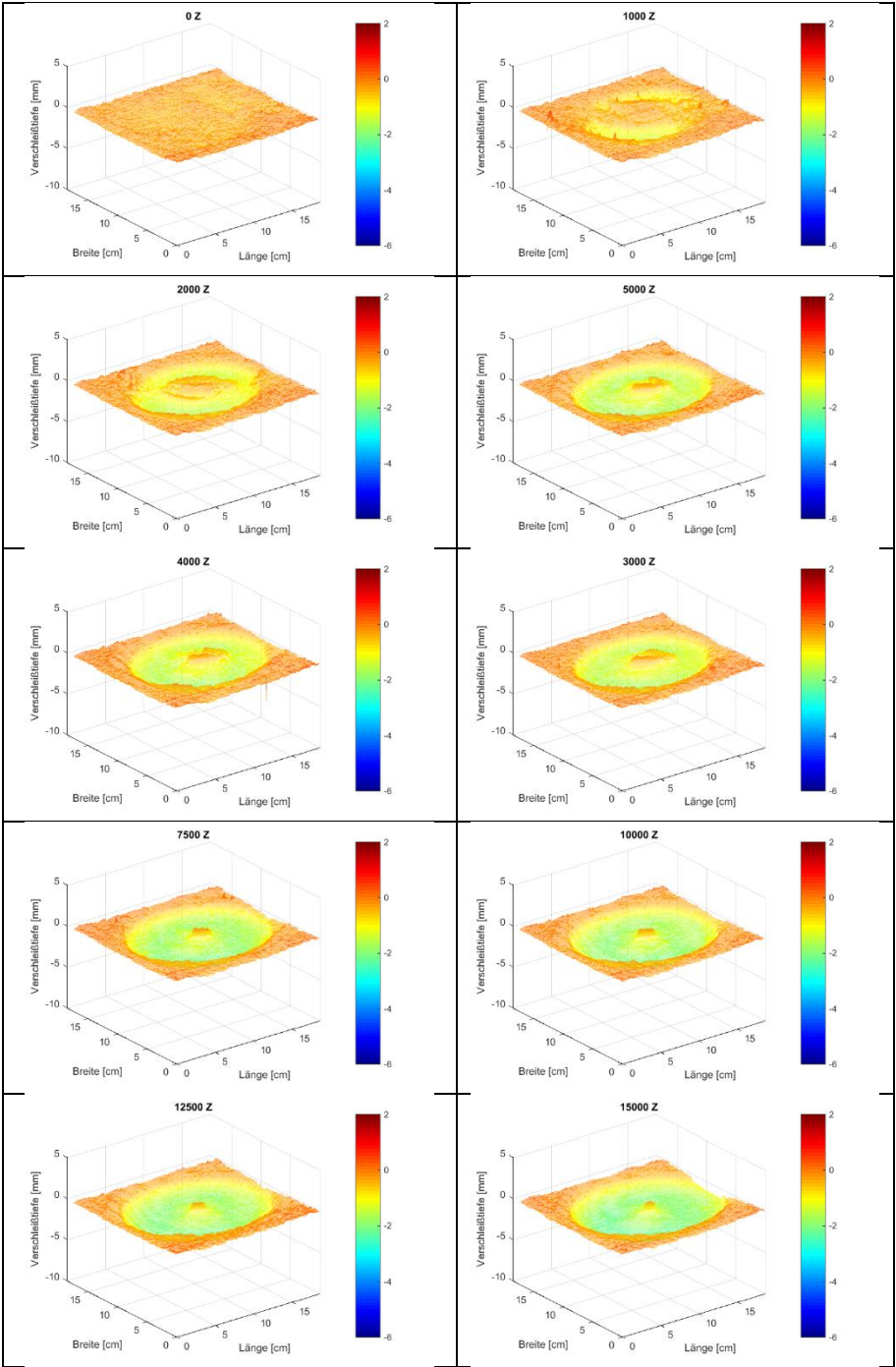
Abb. 8.7: P1\_BCA: Volumenabtrag



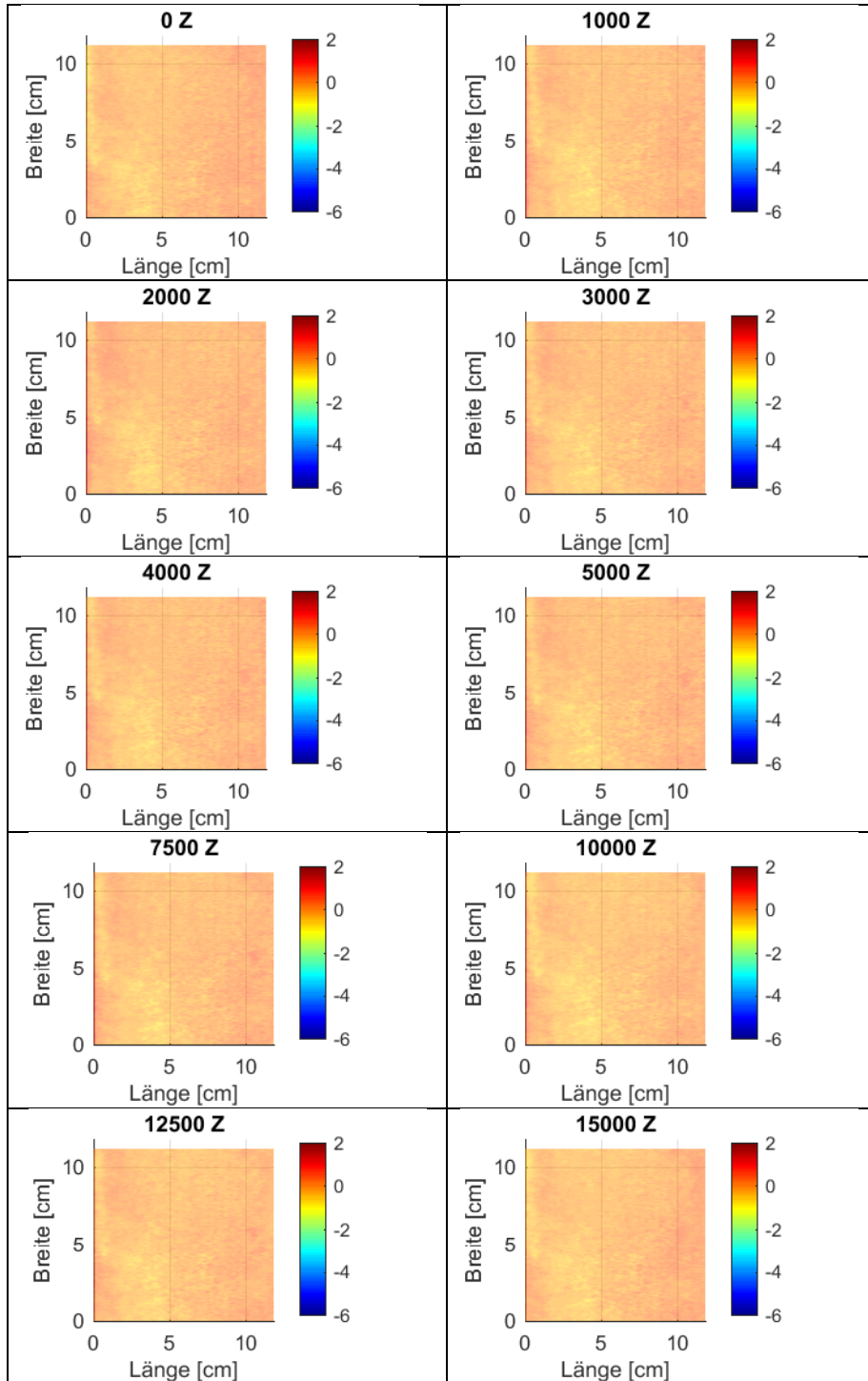
Tab. 8.12: P2\_PAT: Laserauswertung Draufsicht



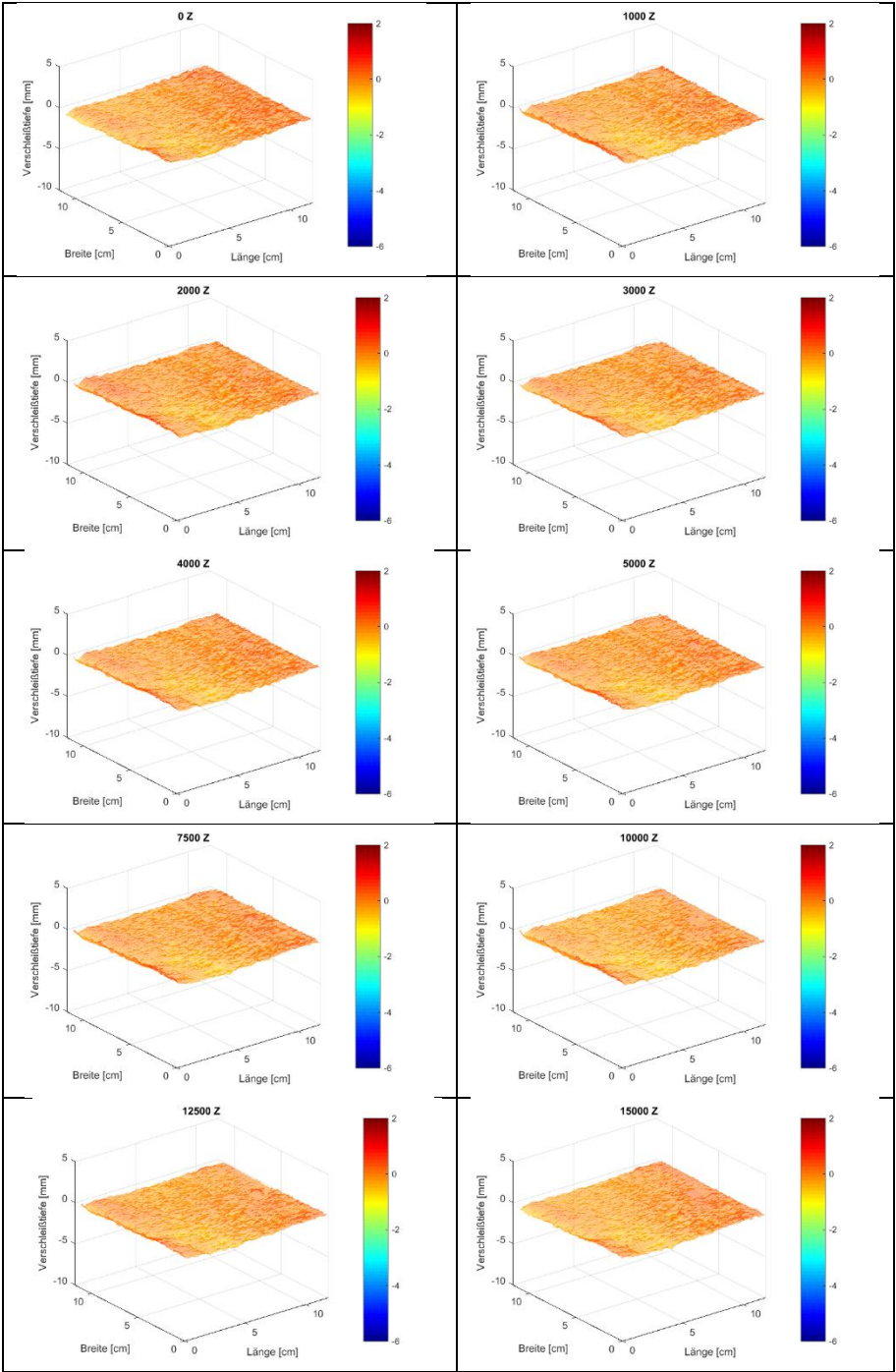
Tab. 8.13: P2\_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht





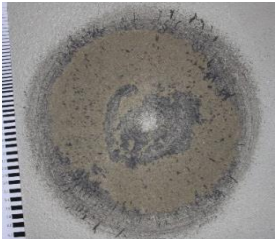


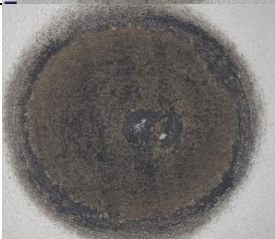



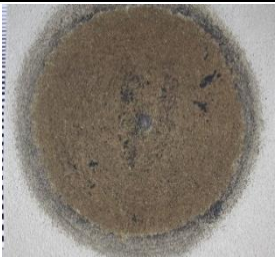
Tab. 8.14: P2\_BCA: Laserauswertung Draufsicht





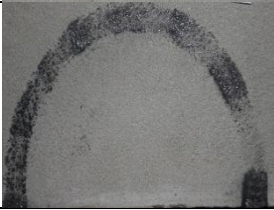

Tab. 8.15: P2\_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.16: P2\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z				1.000 Z
2.000 Z				3.000 Z
4.000 Z				5.000 Z
7.500 Z				10.000 Z
12.500 Z				15.000 Z

Tab. 8.17: P2\_BCA: Fotografische Auswertung

0 Z							5.000 Z
10.000 Z							15.000 Z

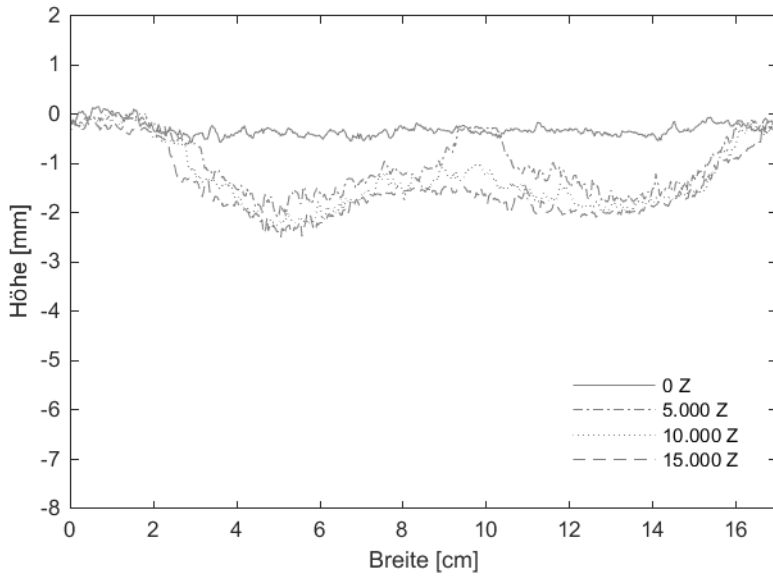


Abb. 8.8: P2\_PAT: Querschnitt in Plattenmitte

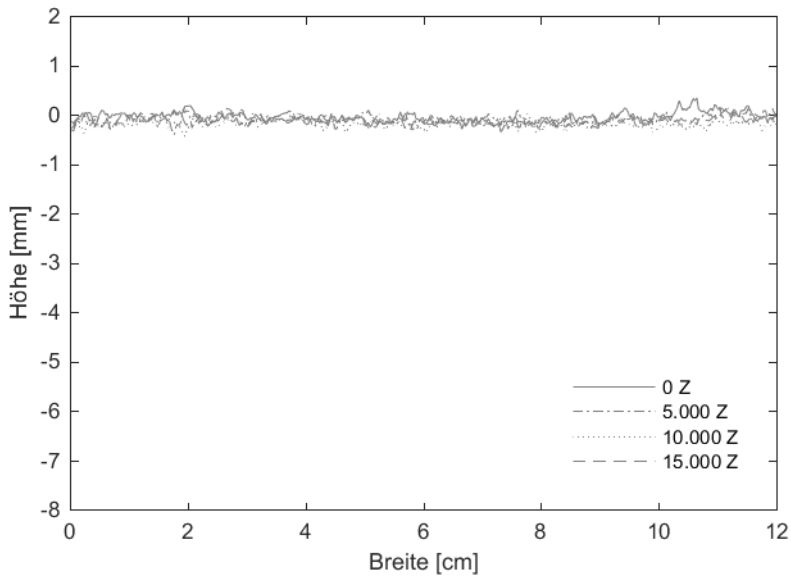


Abb. 8.9: P2\_BCA: Querschnitt in Plattenmitte

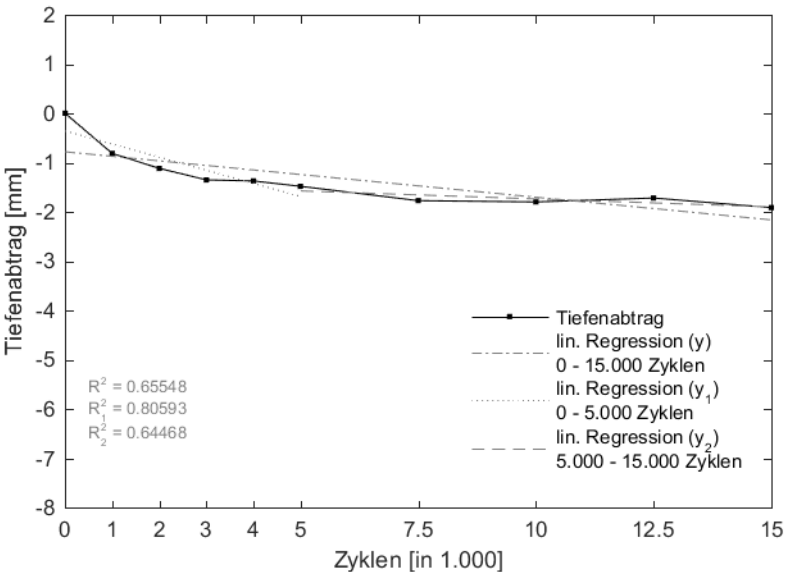


Abb. 8.10: P2\_PAT: Maximale Verschleißtiefe

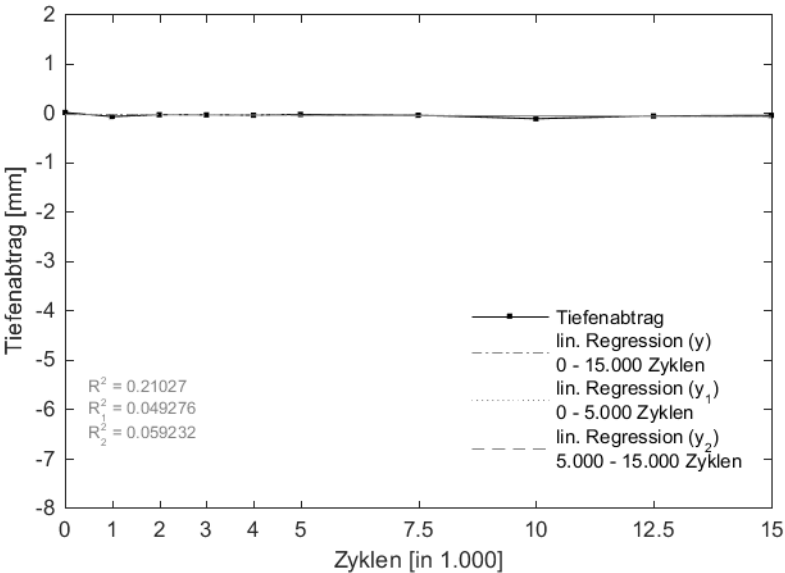


Abb. 8.11: P2\_BCA: Maximale Verschleißtiefe



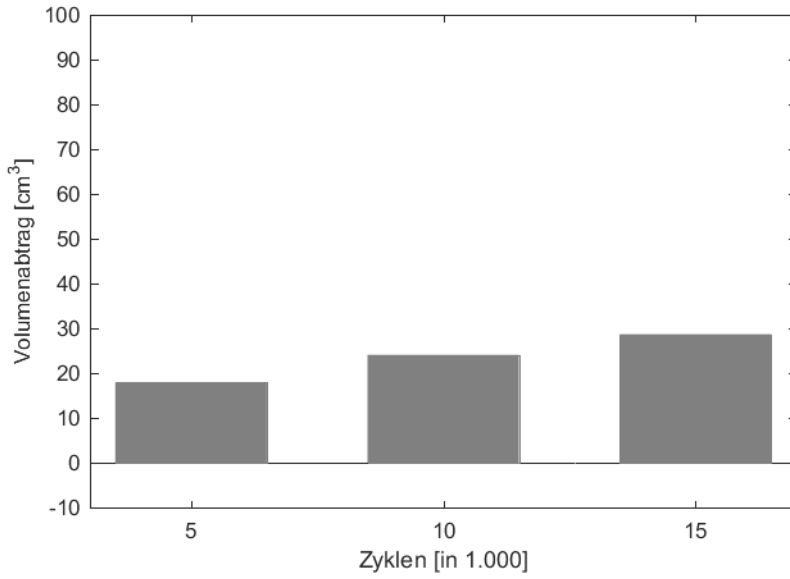


Abb. 8.12: P1\_PAT: Volumenabtrag

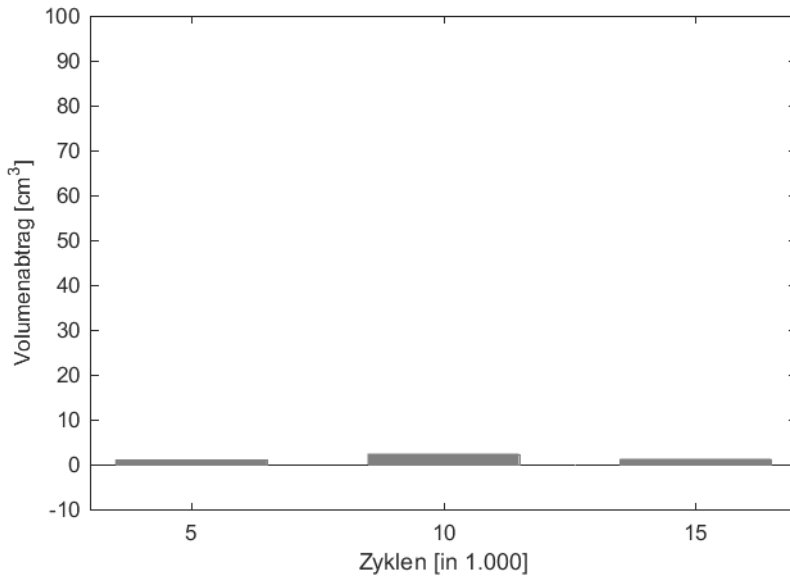
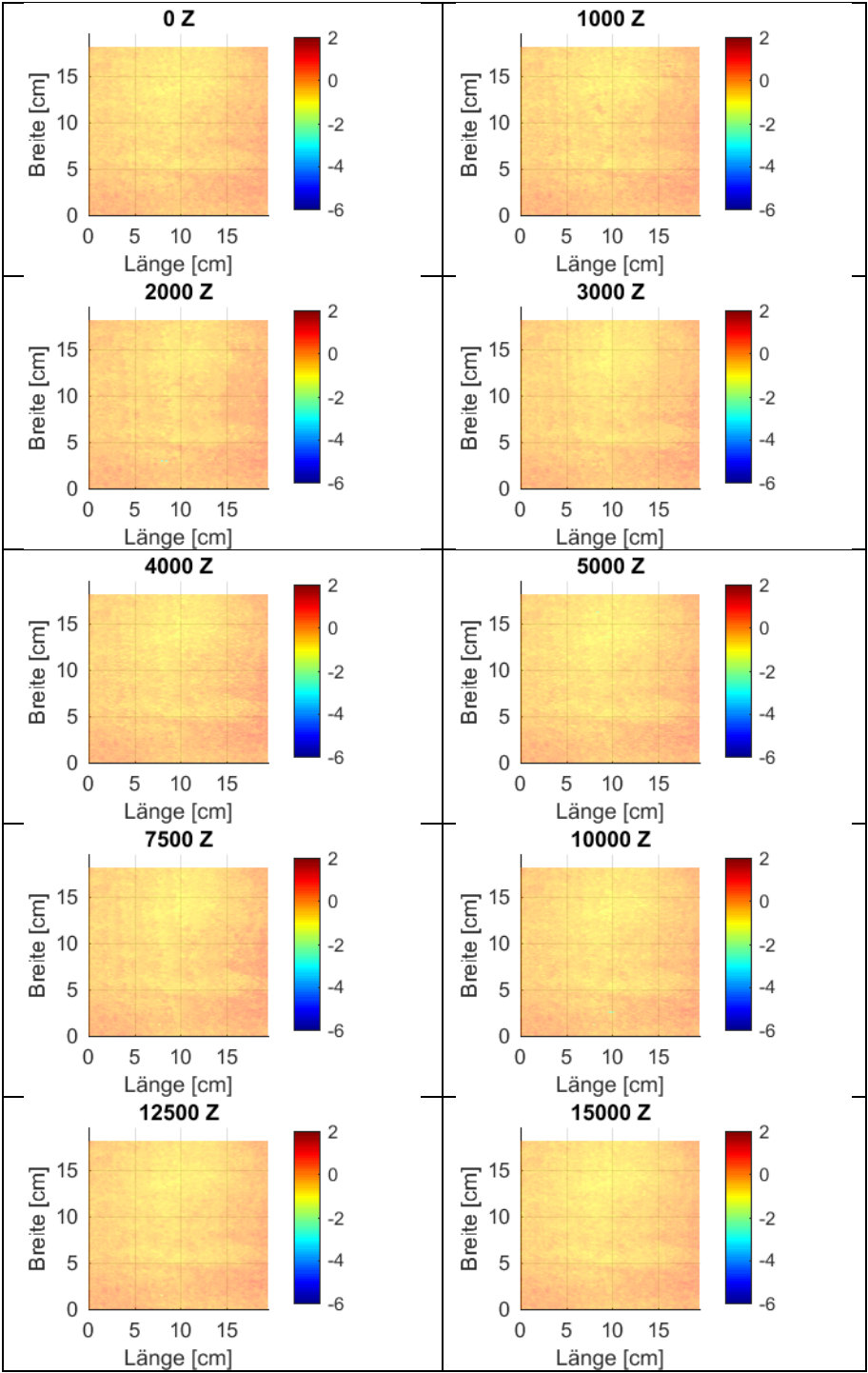
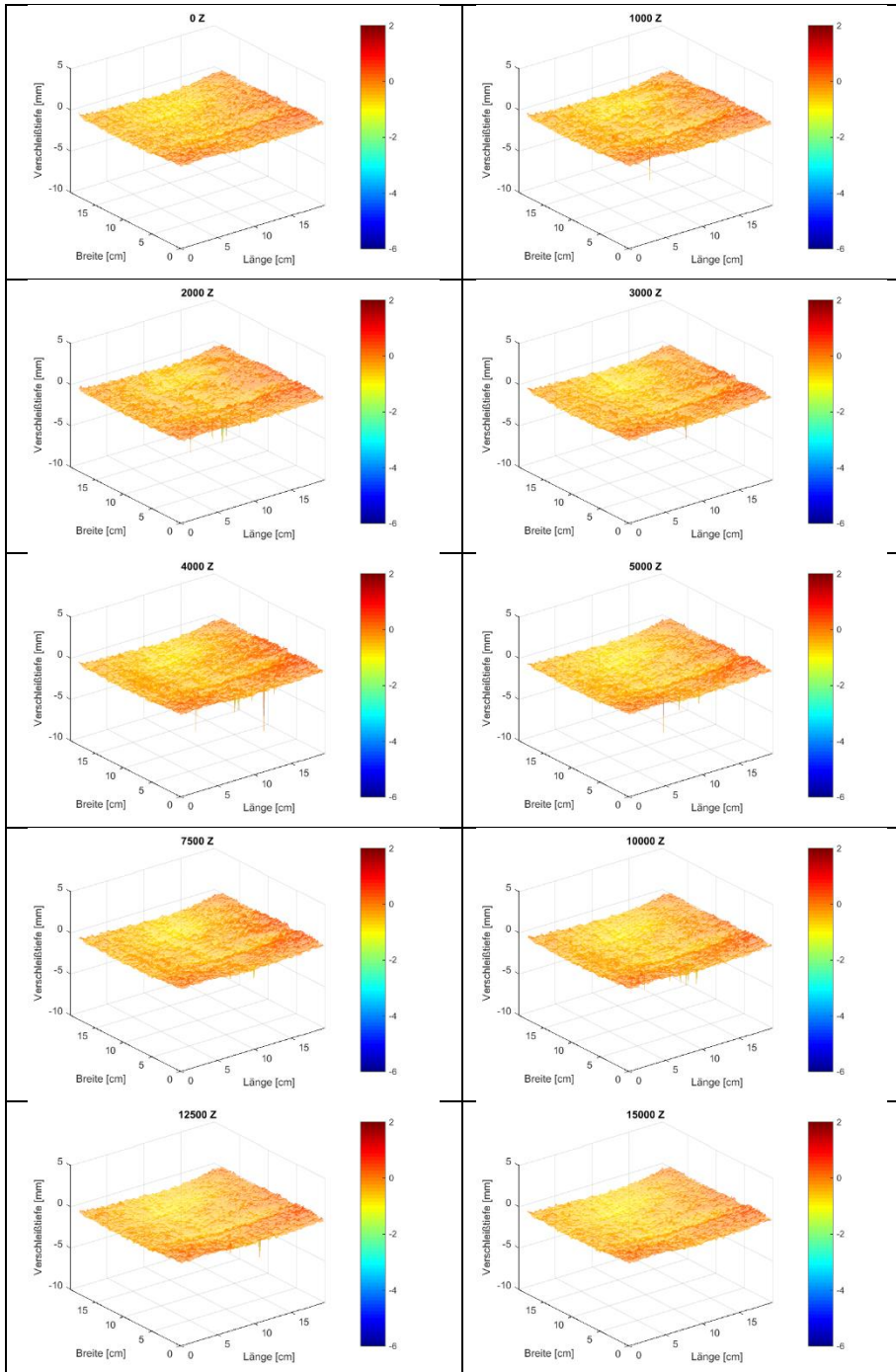


Abb. 8.13: P2\_BCA: Volumenabtrag

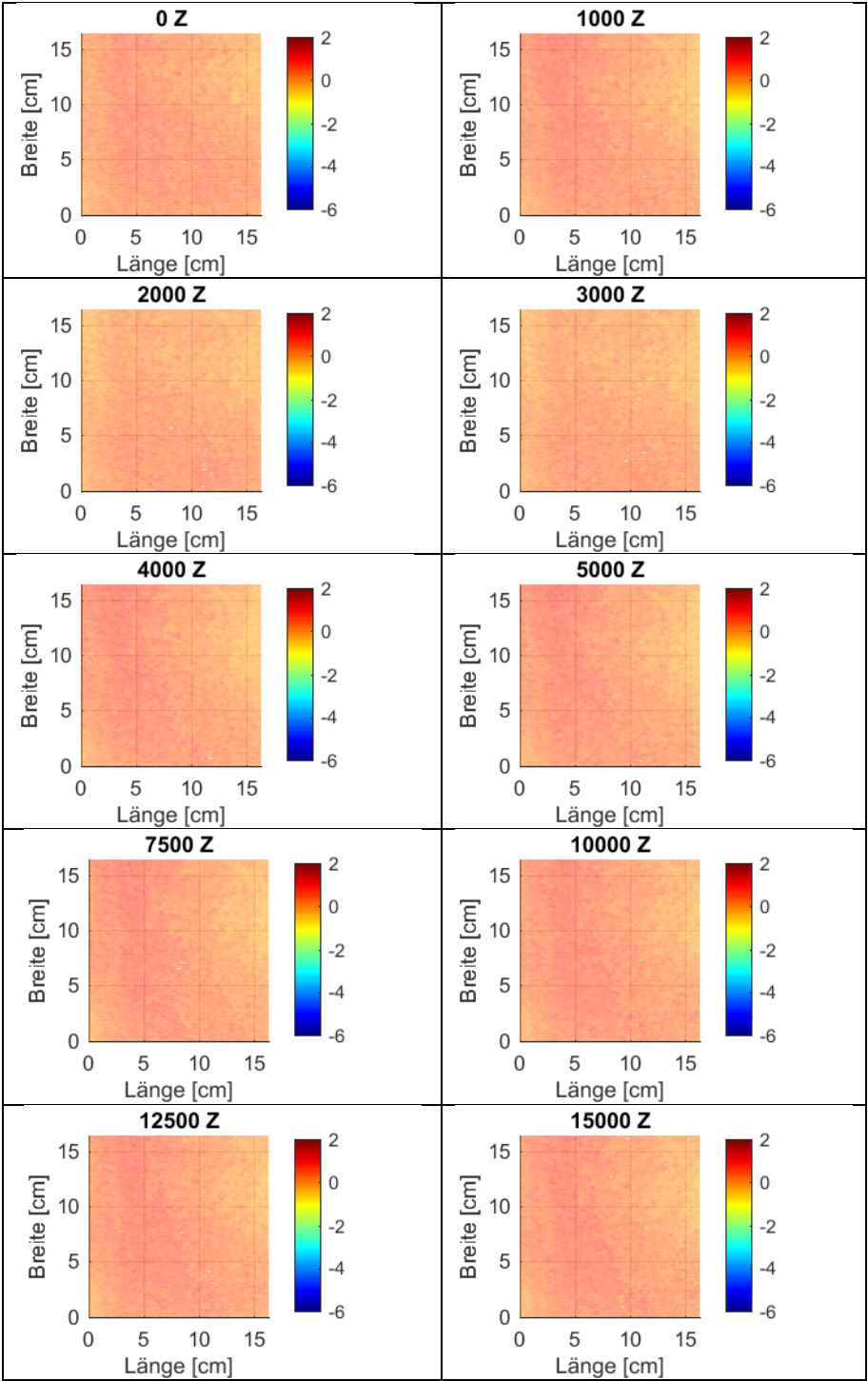
Tab. 8.18: P3\_PAT: Laserauswertung Draufsicht



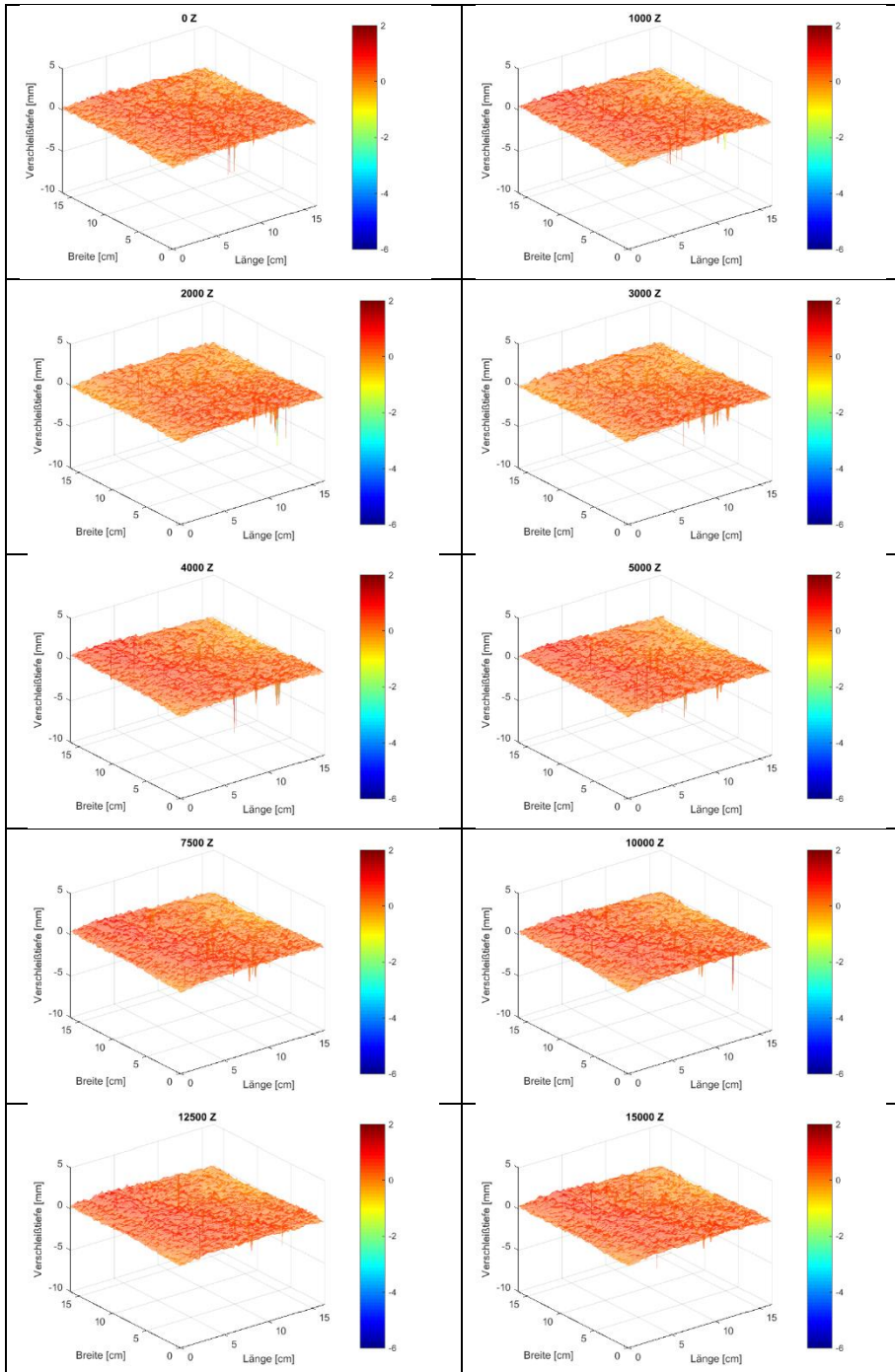
Tab. 8.19: P3\_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht




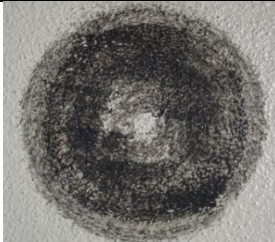
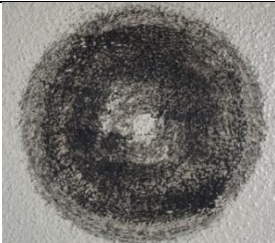
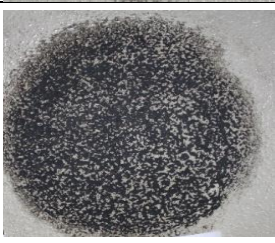
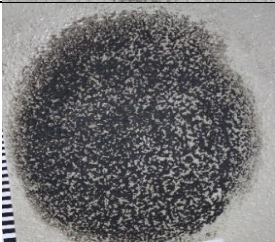
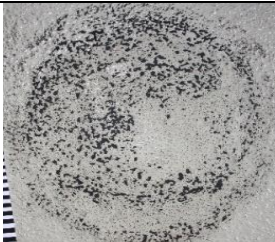
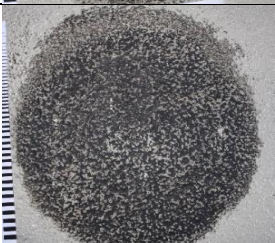

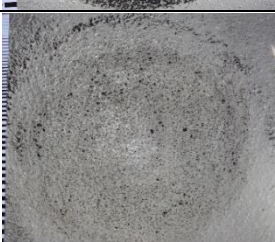
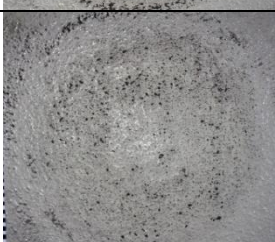
Tab. 8.20: P3\_BCA: Laserauswertung Draufsicht





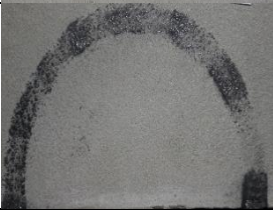

Tab. 8.21: P3\_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.22: P3\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z			1.000 Z
2.000 Z			3.000 Z
4.000 Z			5.000 Z
7.500 Z			10.000 Z
12.500 Z			15.000 Z

Tab. 8.23: P3\_BCA: Fotografische Auswertung

0 Z					5.000 Z
10.000 Z					15.000 Z



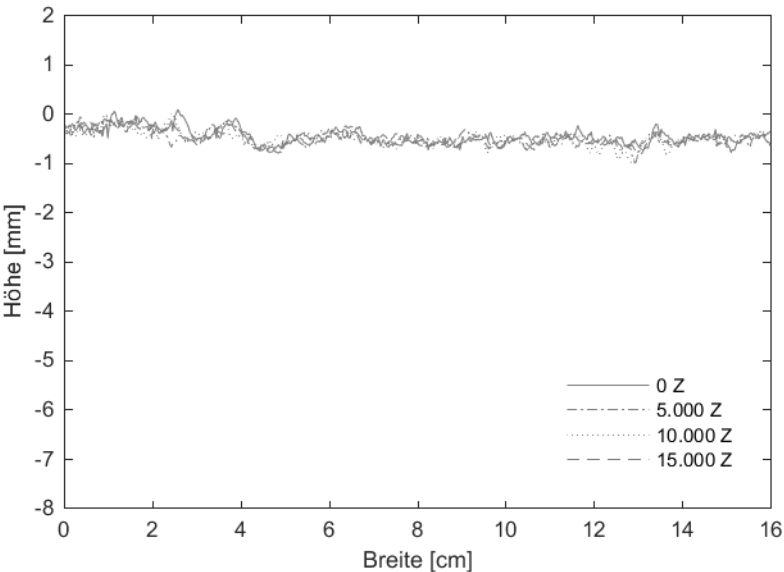


Abb. 8.14: P3\_PAT: Querschnitt in Plattenmitte

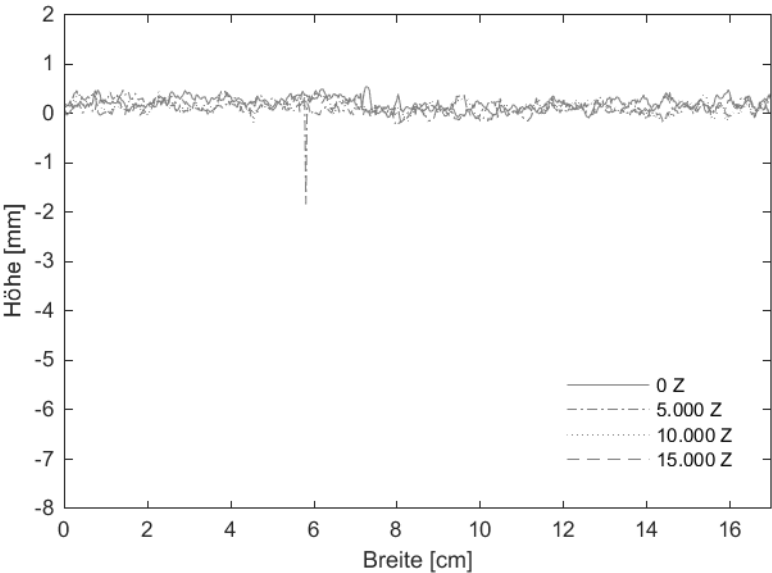


Abb. 8.15: P3\_BCA: Querschnitt in Plattenmitte



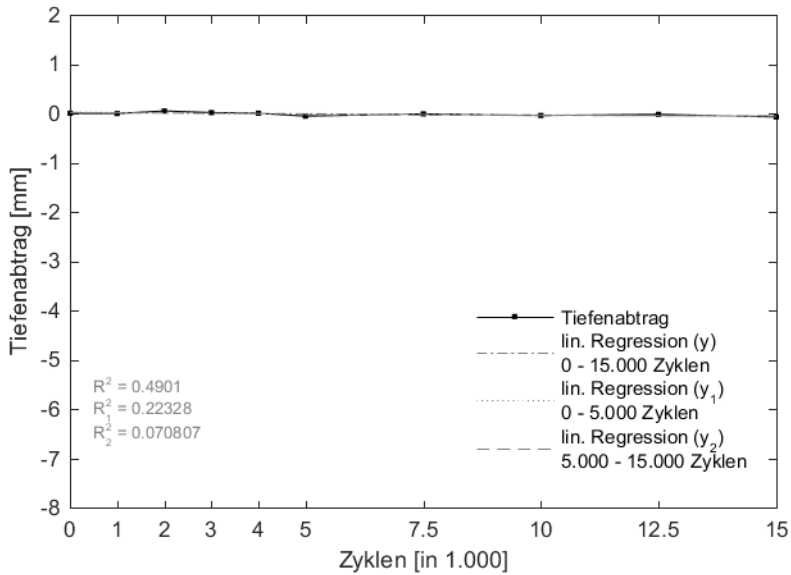


Abb. 8.16: P3\_PAT: Maximale Verschleißtiefe

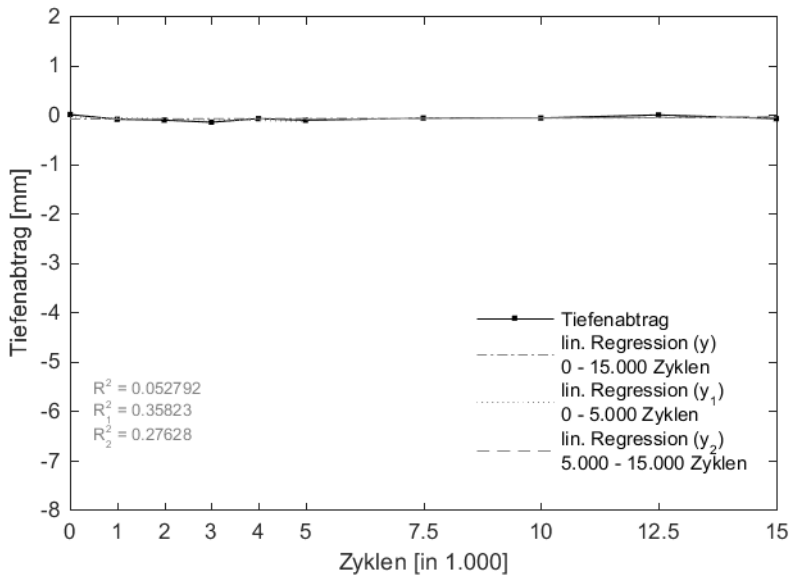


Abb. 8.17: P3\_BCA: Maximale Verschleißtiefe

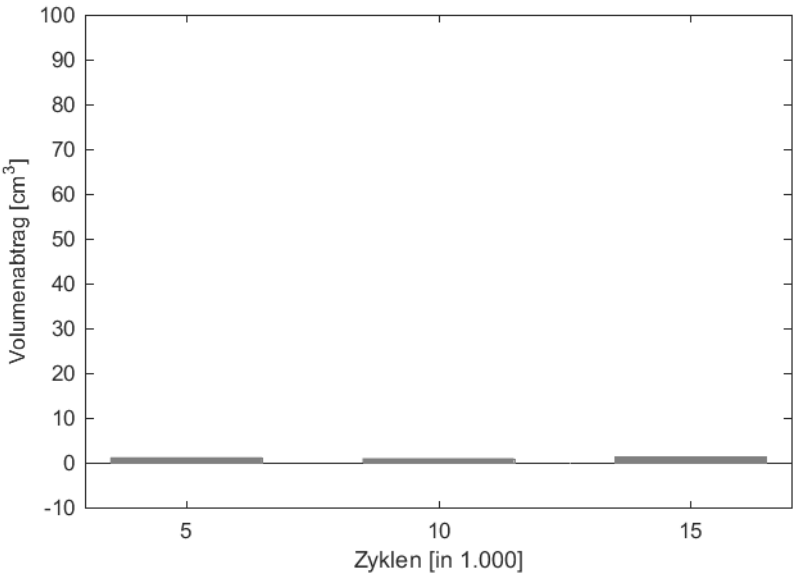


Abb. 8.18: P3\_PAT: Volumenabtrag

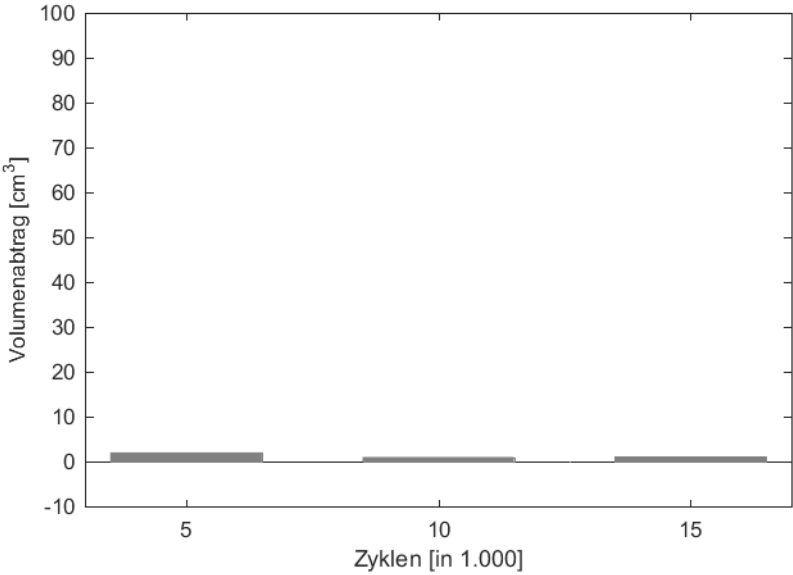
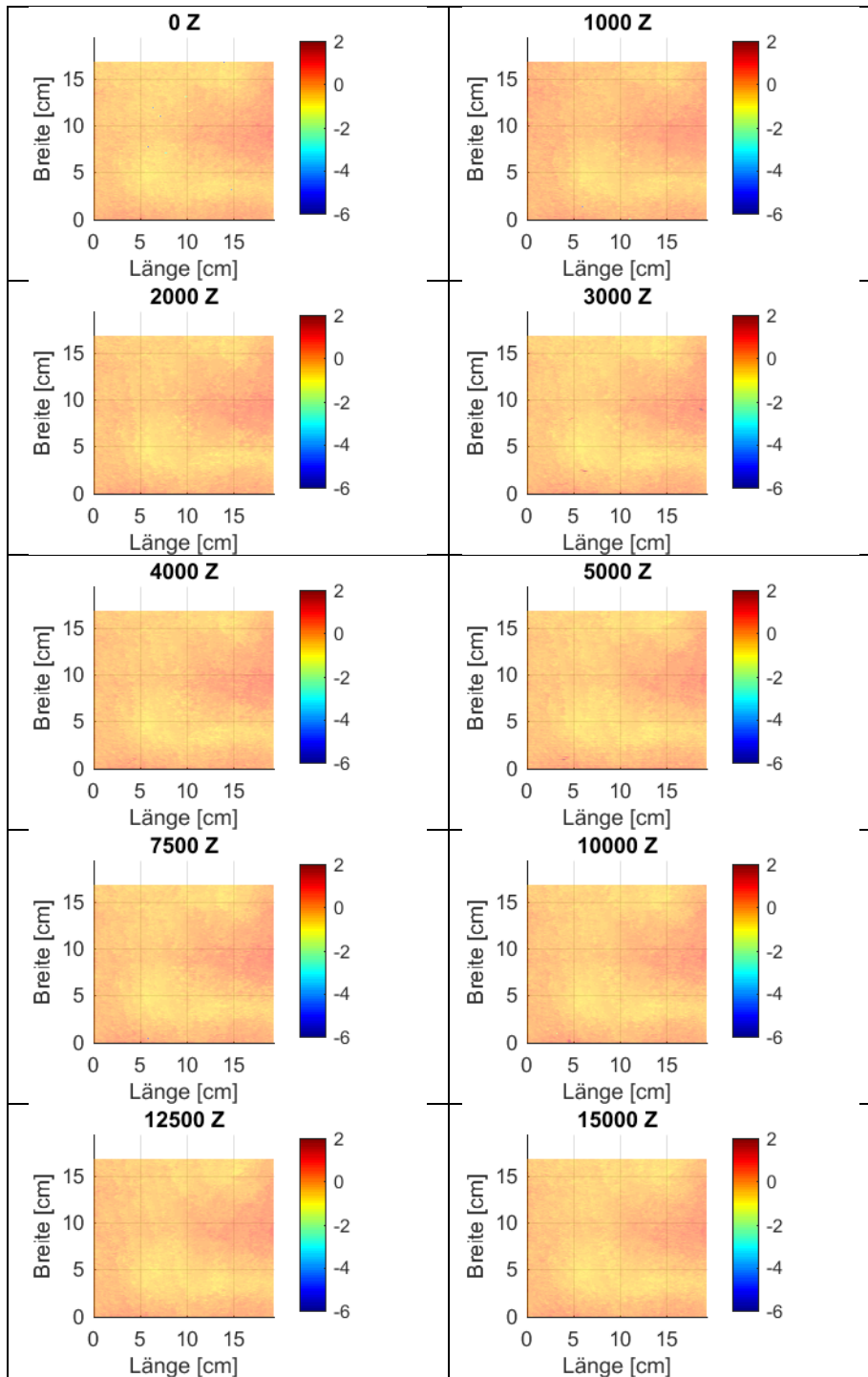
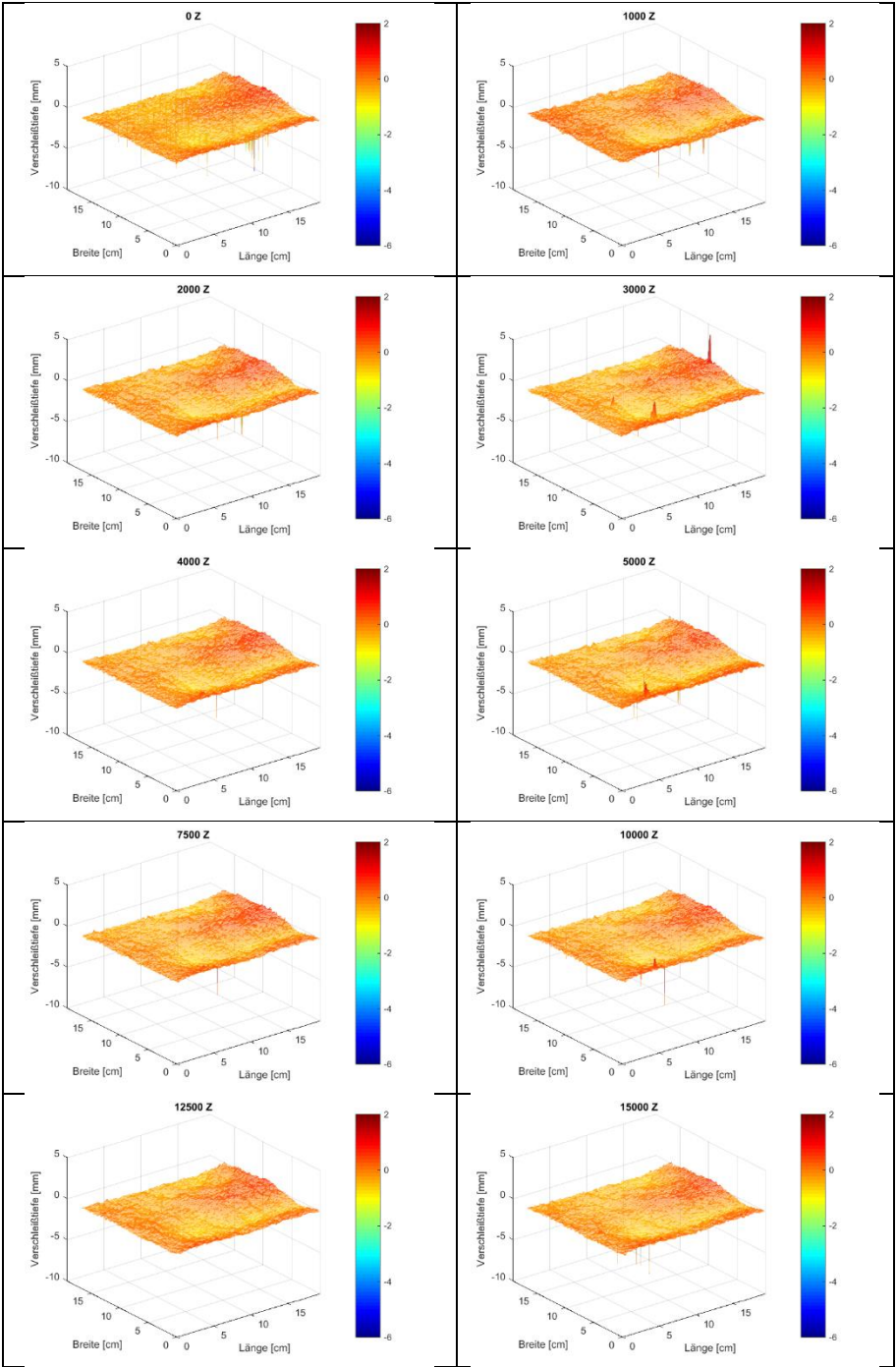


Abb. 8.19: P3\_BCA: Volumenabtrag

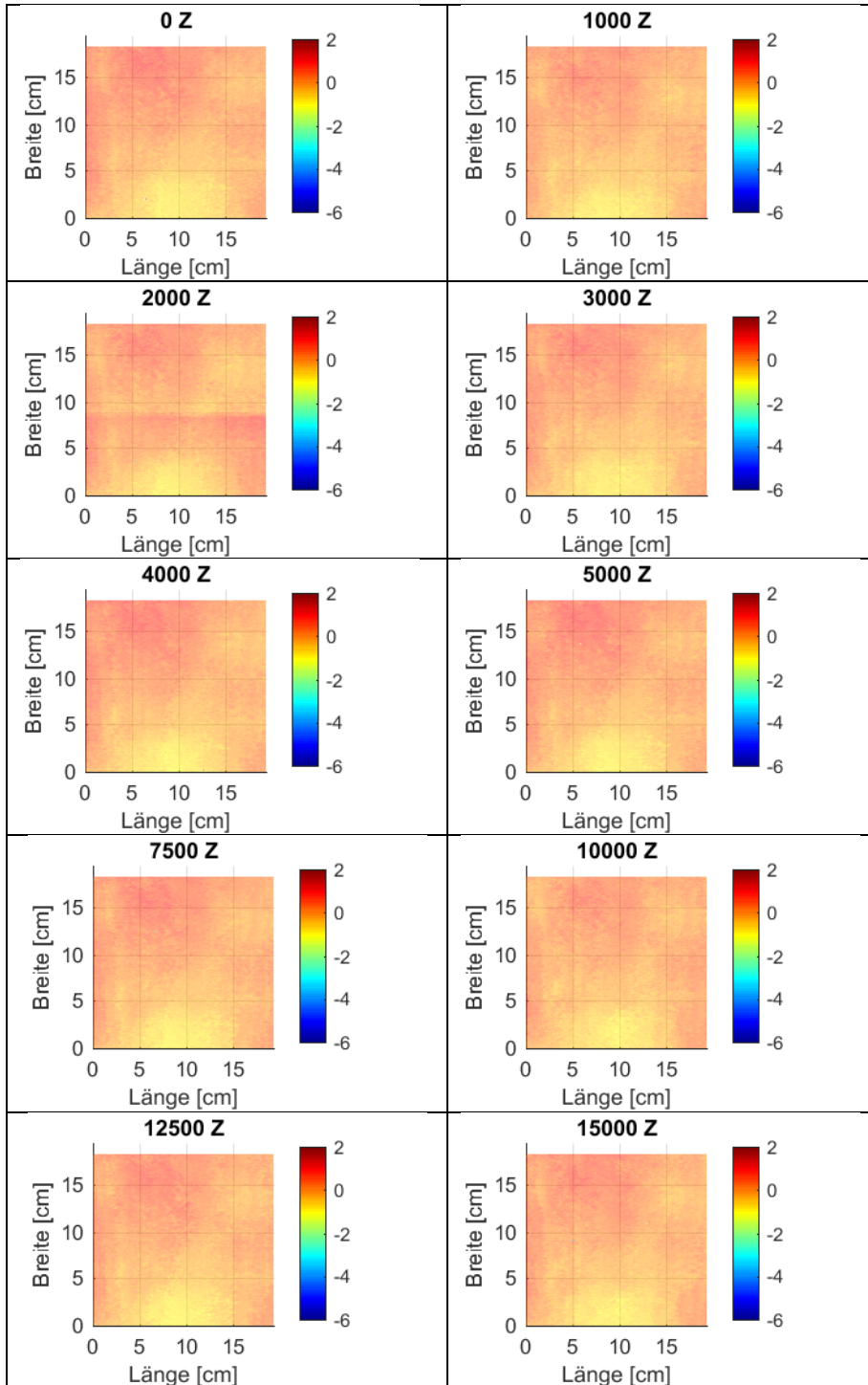
Tab. 8.24: P4\_PAT: Laserauswertung Draufsicht



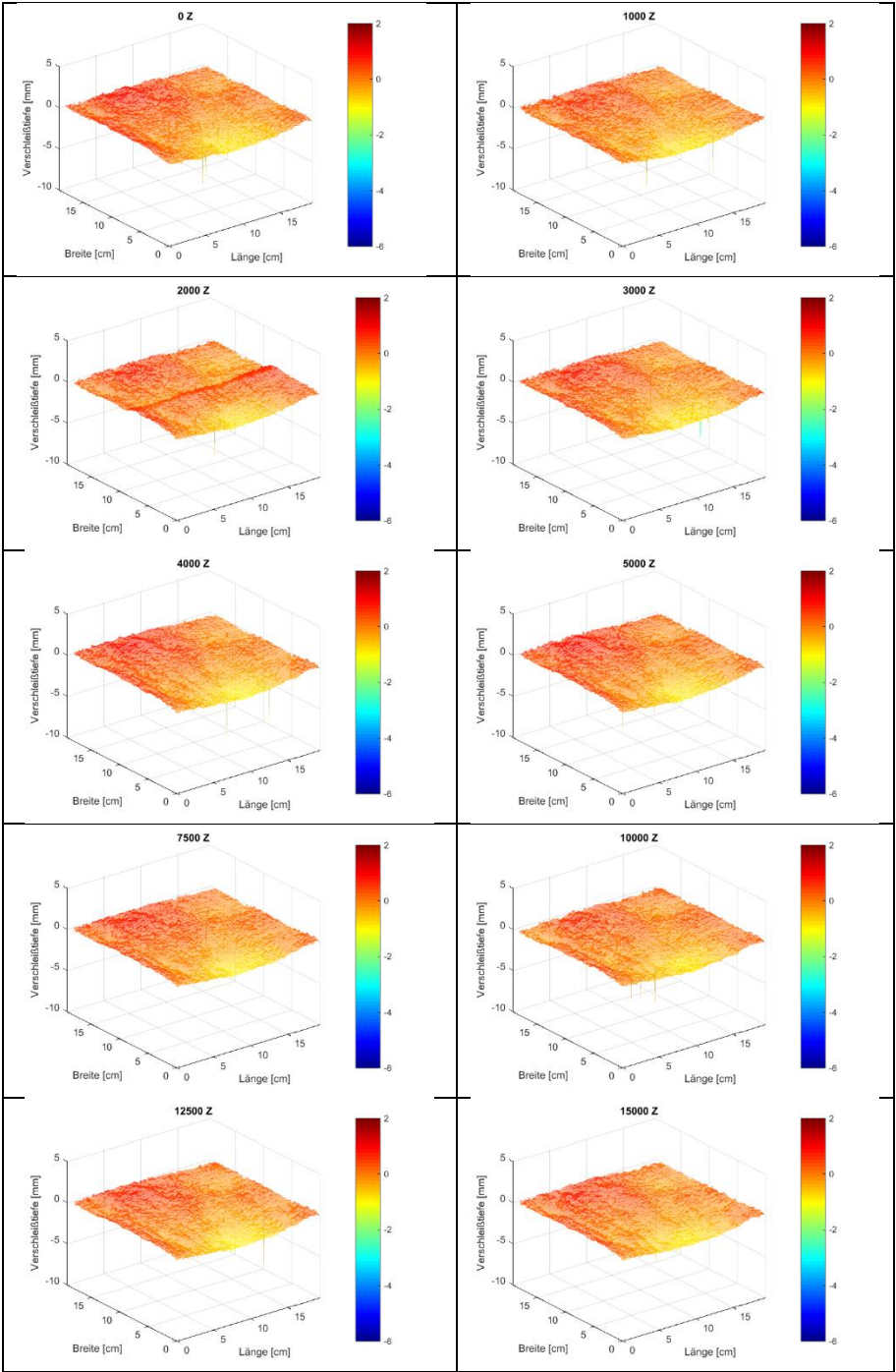
Tab. 8.25: P4\_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht





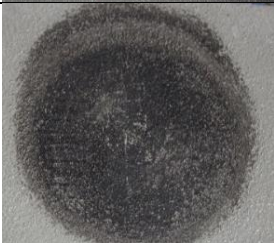
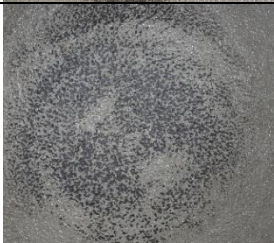
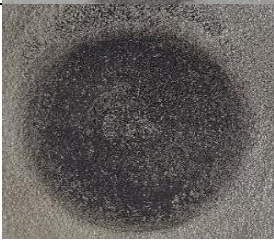
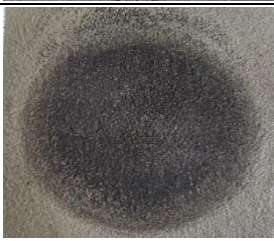
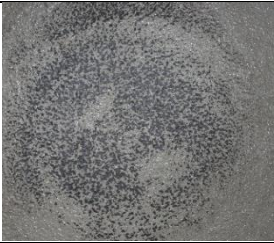



Tab. 8.26: P4\_BCA: Laserauswertung Draufsicht







Tab. 8.27: P4\_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.28: P4\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z
7.500 Z					10.000 Z
12.500 Z					15.000 Z

Tab. 8.29: P4\_BCA: Fotografische Auswertung

0 Z							5.000 Z
10.000 Z							15.000 Z



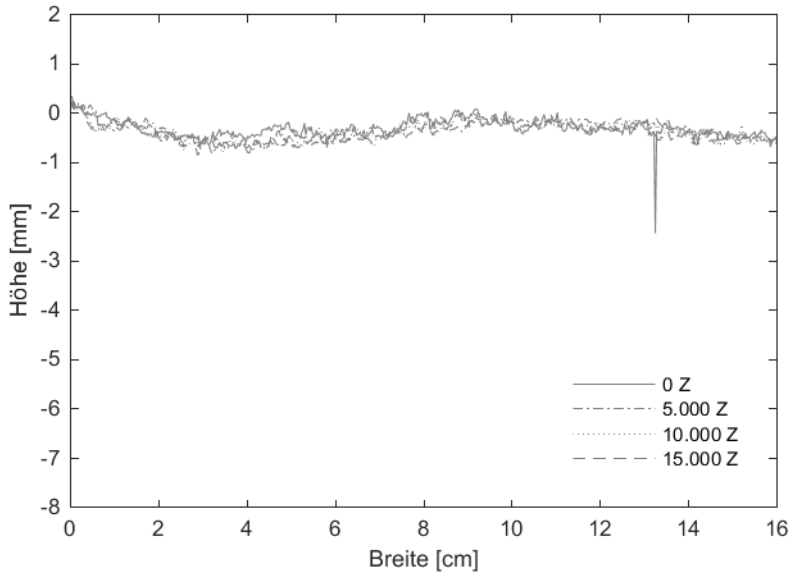


Abb. 8.20: P4\_PAT: Querschnitt in Plattenmitte

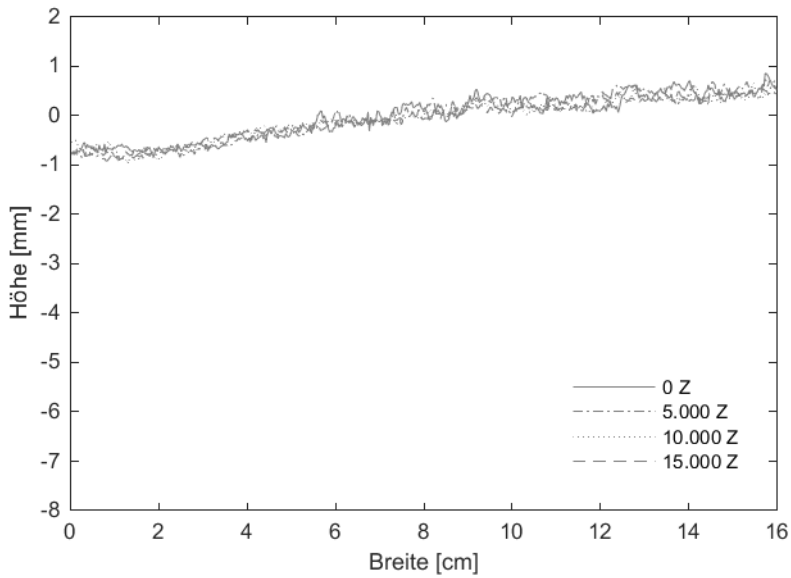


Abb. 8.21: P4\_BCA: Querschnitt in Plattenmitte

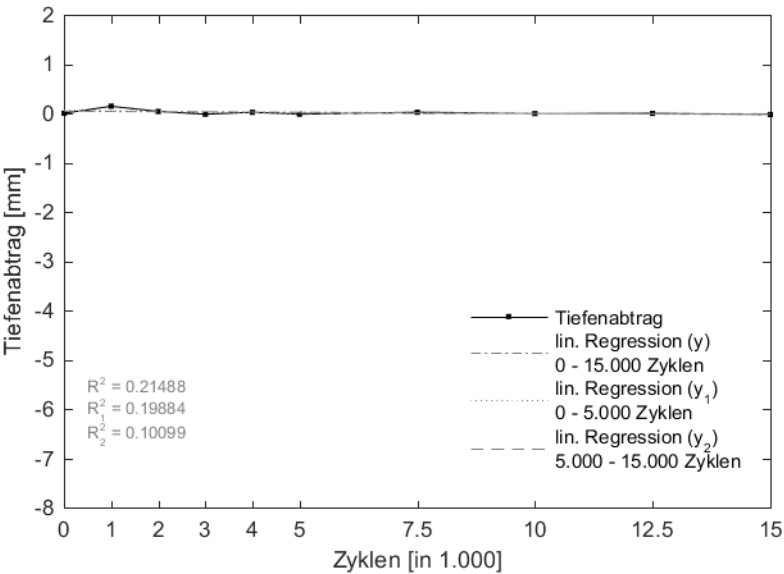


Abb. 8.22: P4\_PAT: Maximale Verschleißtiefe

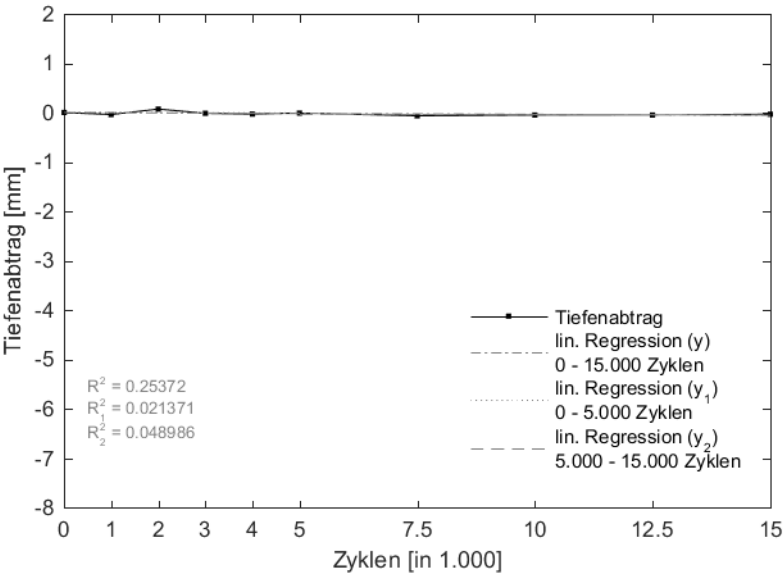


Abb. 8.23: P4\_BCA: Maximale Verschleißtiefe

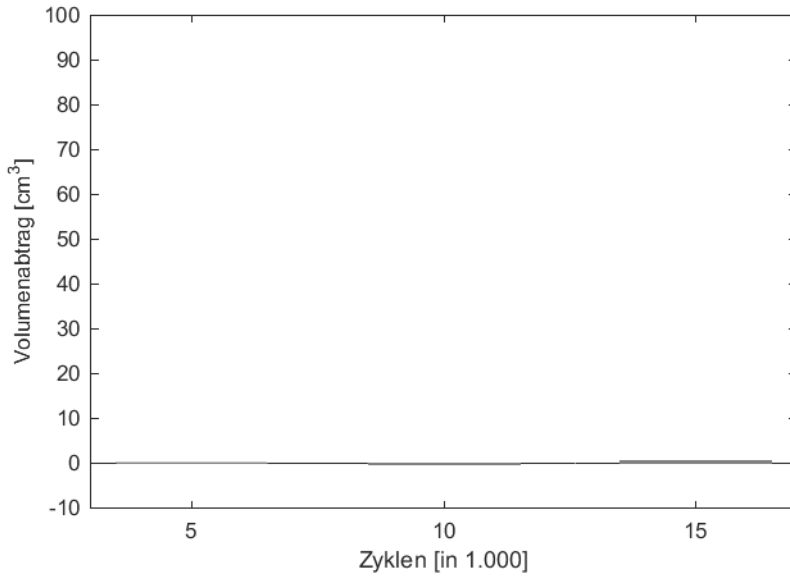


Abb. 8.24: P4\_PAT: Volumenabtrag

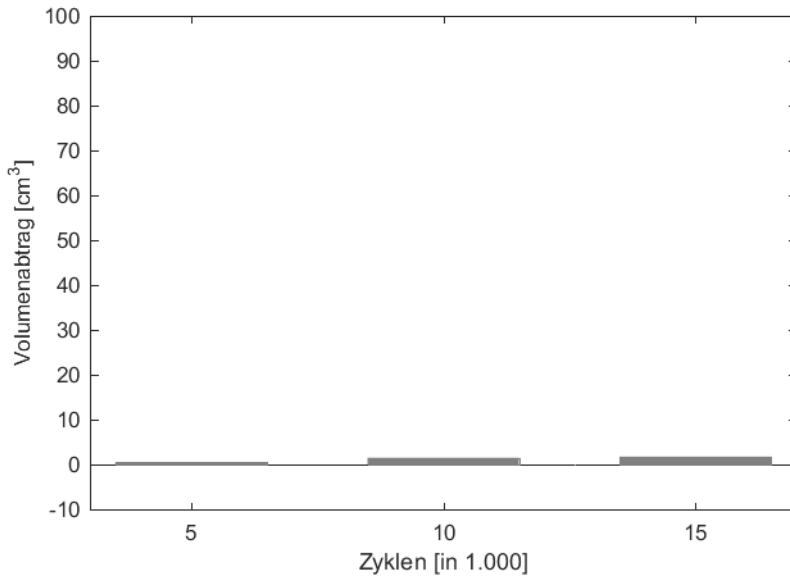
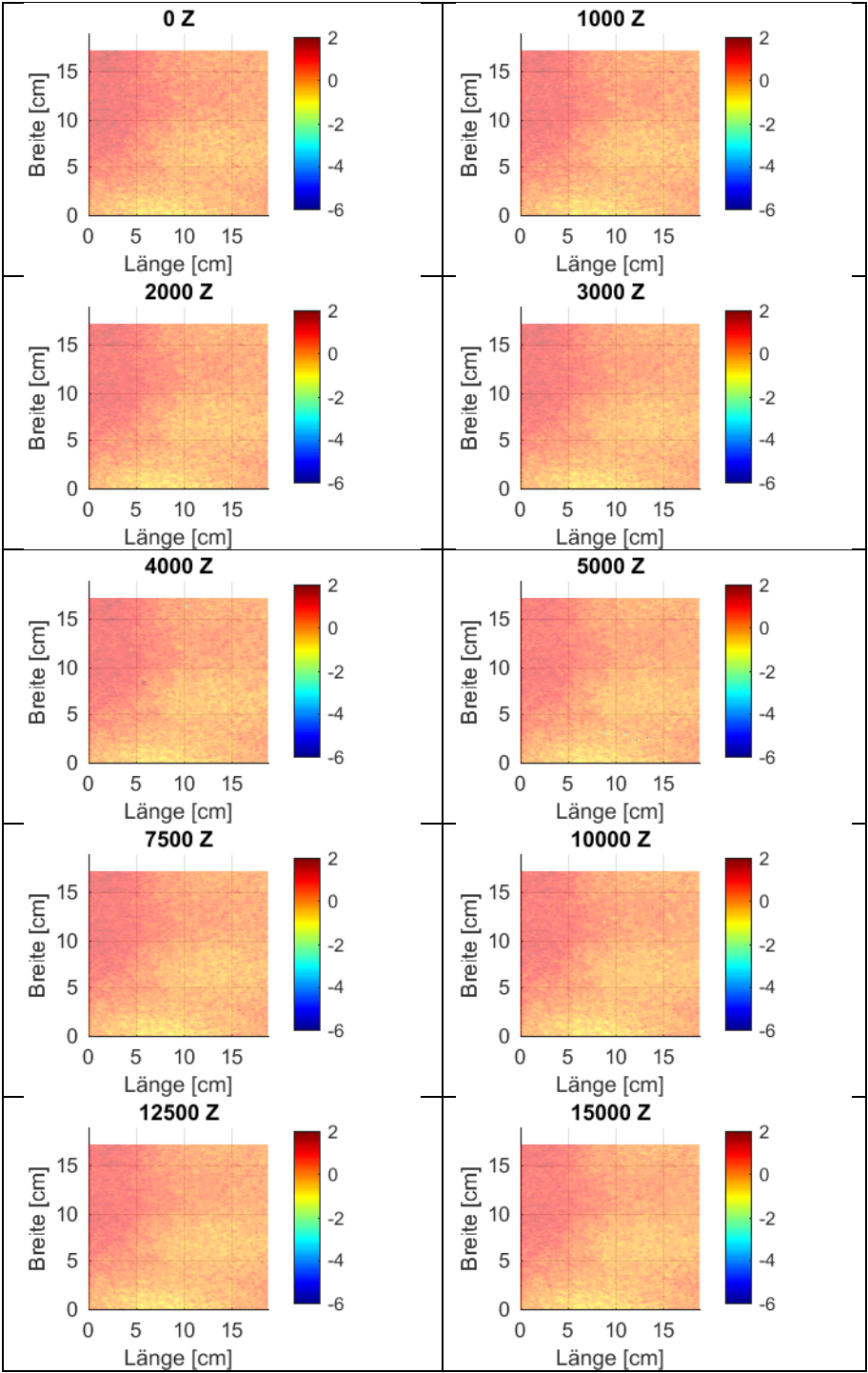
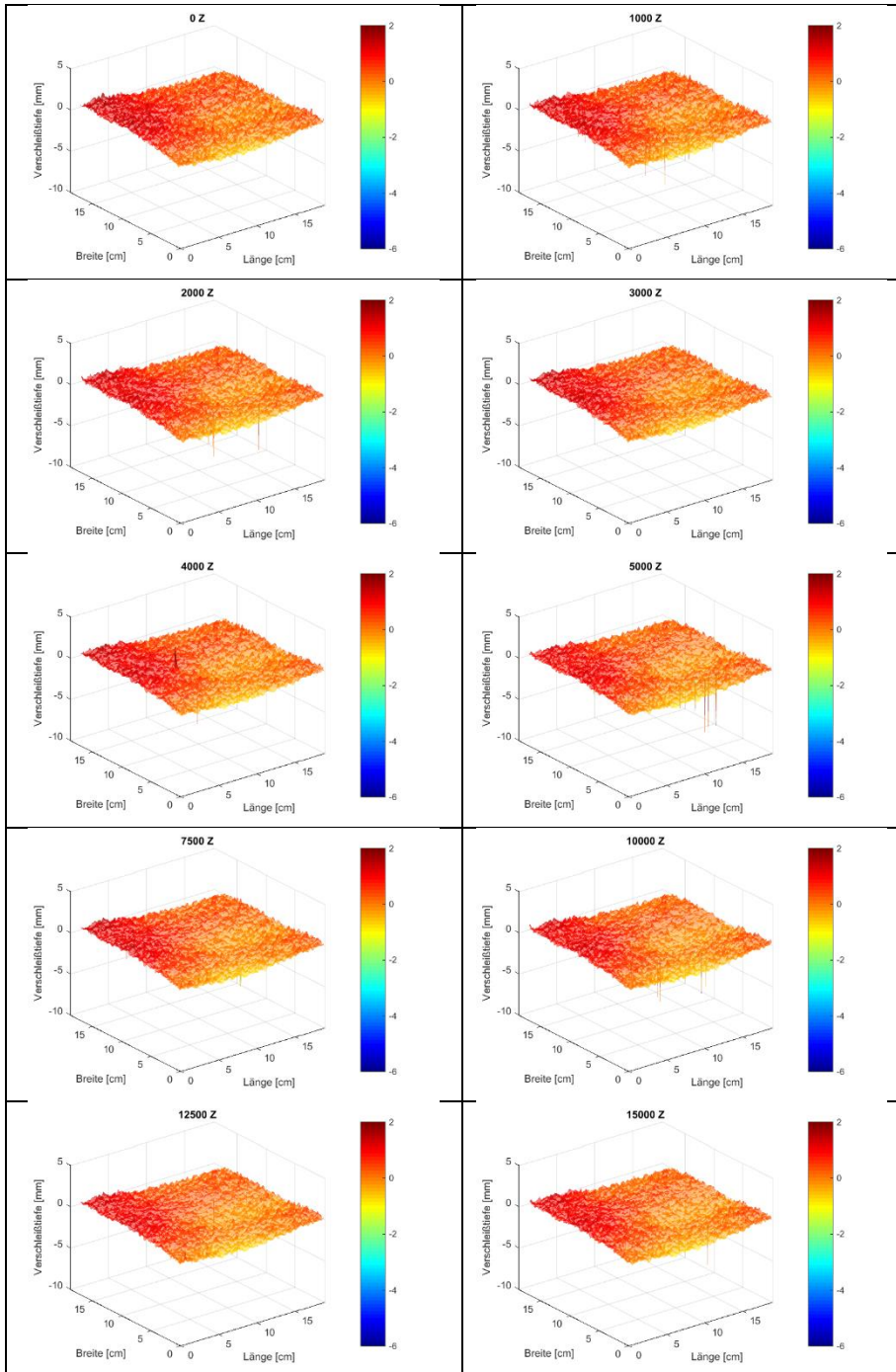


Abb. 8.25: P4\_BCA: Volumenabtrag

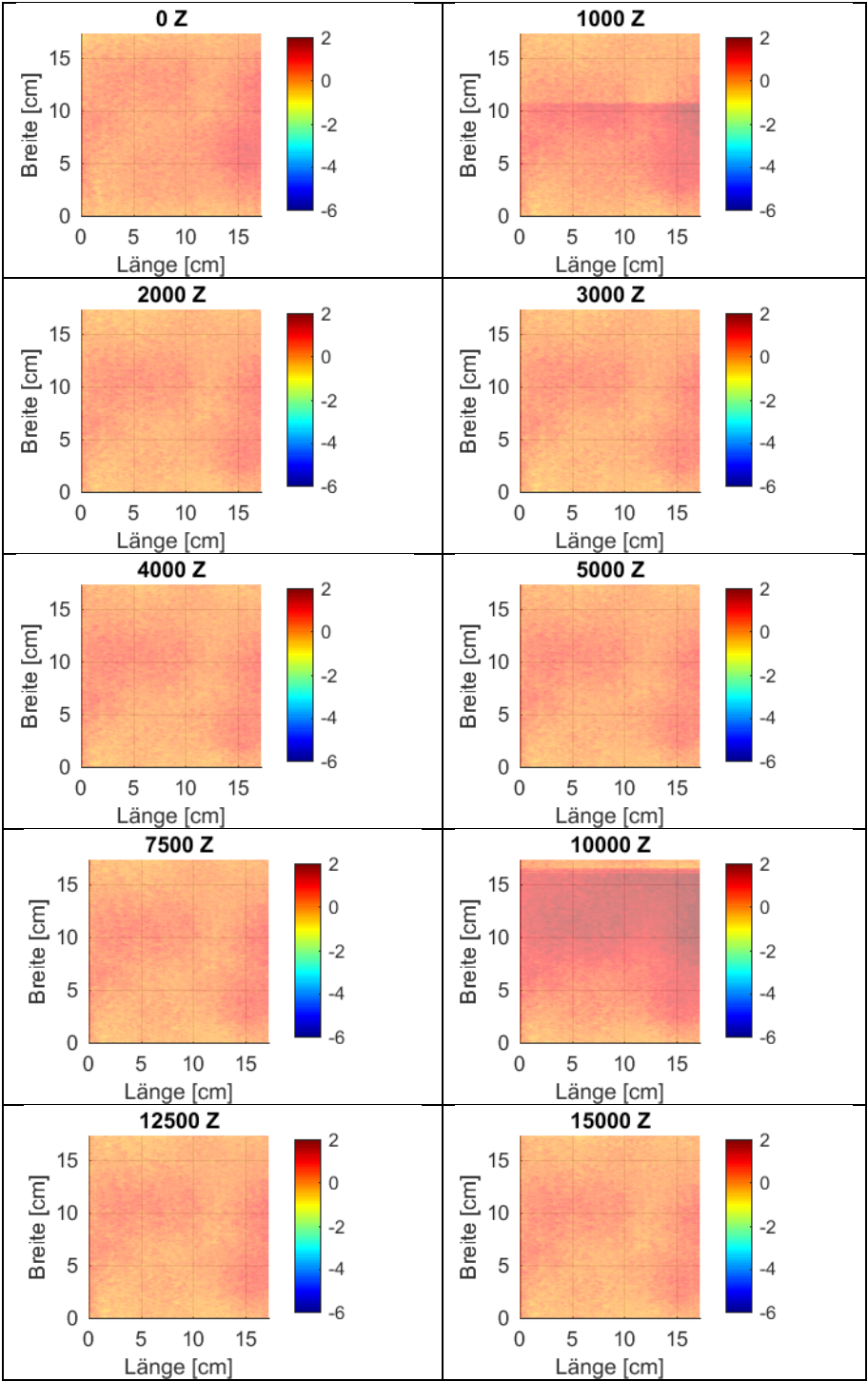
Tab. 8.30: P5\_PAT: Laserauswertung Draufsicht



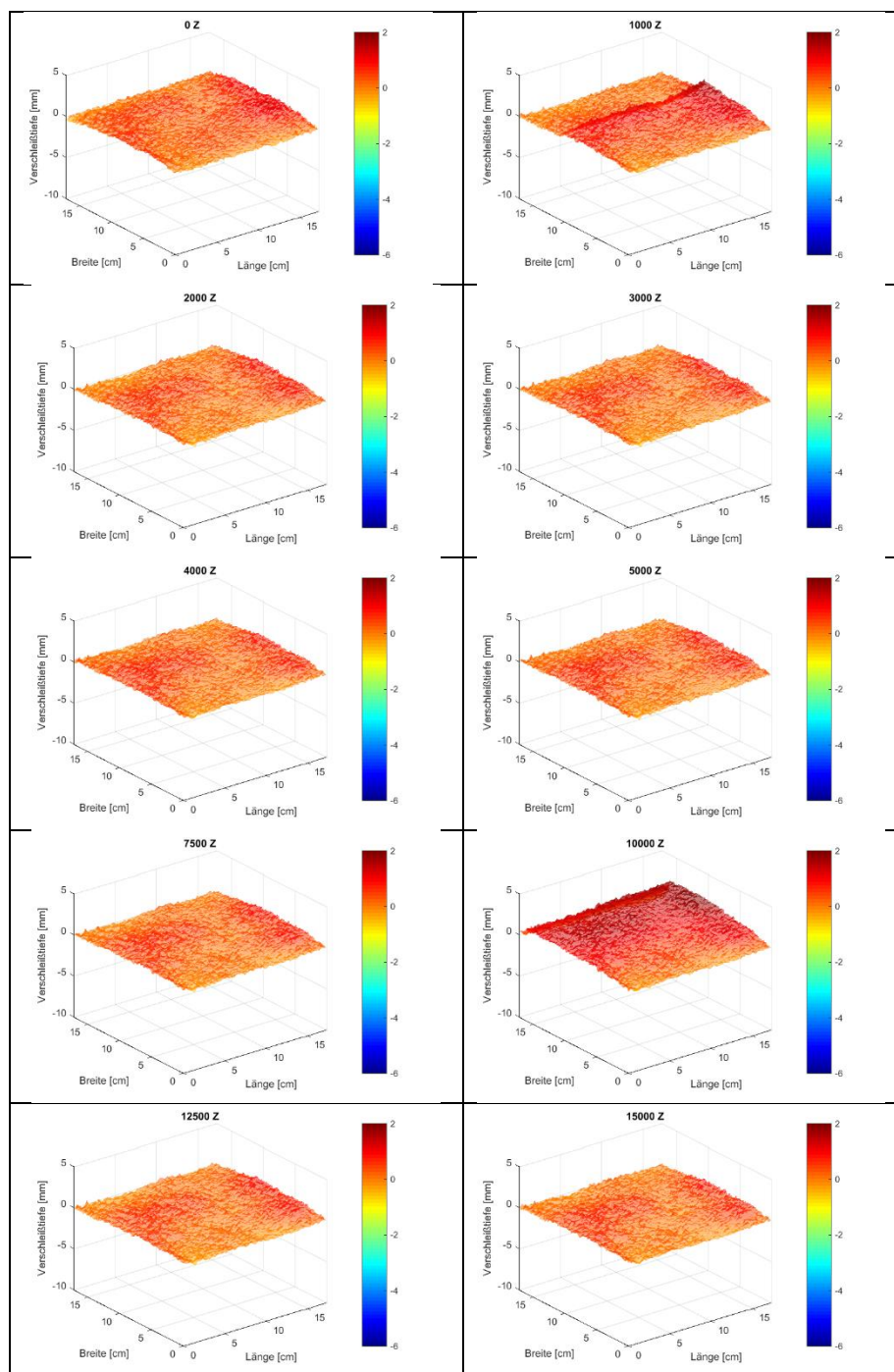
Tab. 8.31: P5\_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht



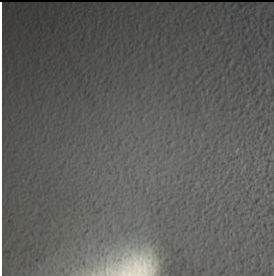
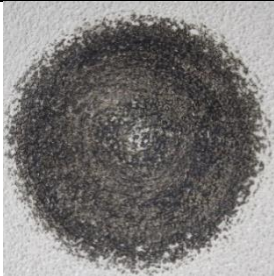


Tab. 8.32: P5\_BCA: Laserauswertung Draufsicht




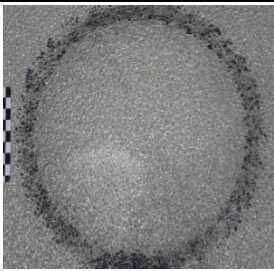
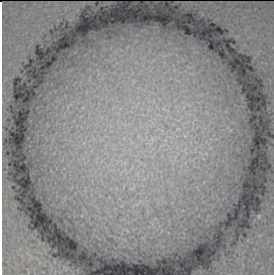
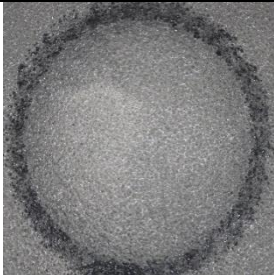
Tab. 8.33: P5\_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.34: P5\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z							5.000 Z
10.000 Z							15.000 Z

Tab. 8.35: P5\_BCA: Fotografische Auswertung

0 Z							5.000 Z
10.000 Z							15.000 Z



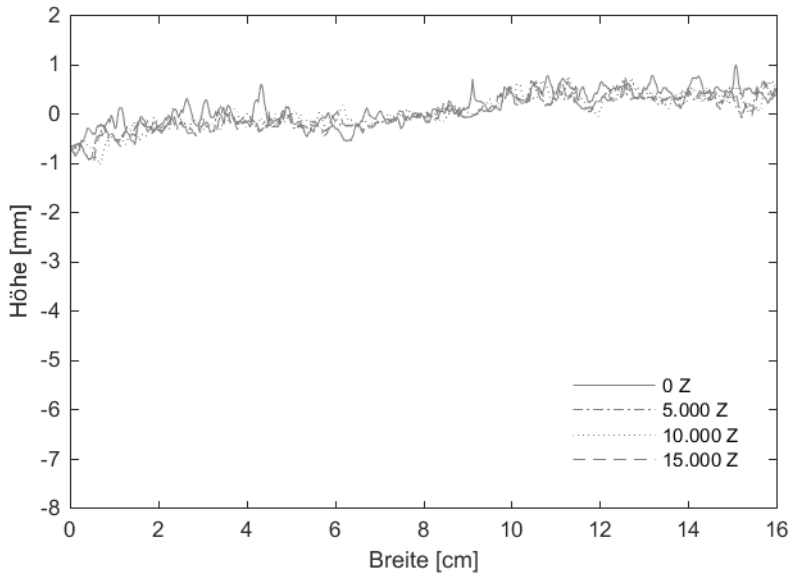


Abb. 8.26: P5\_PAT: Querschnitt in Plattenmitte

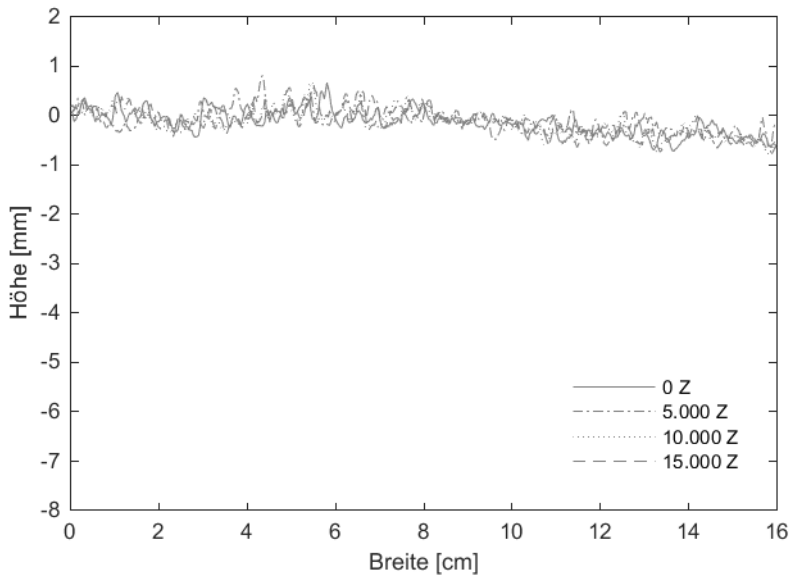


Abb. 8.27: P5\_BCA: Querschnitt in Plattenmitte

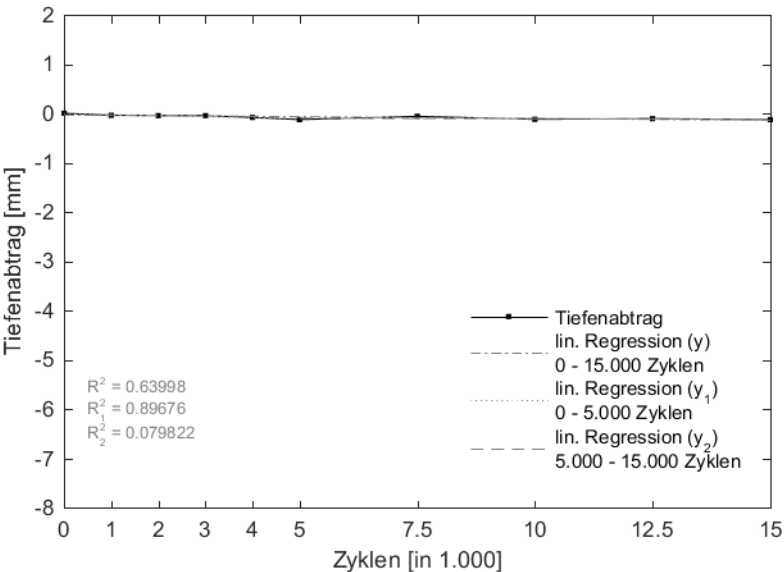


Abb. 8.28: P5\_PAT: Maximale Verschleißtiefe

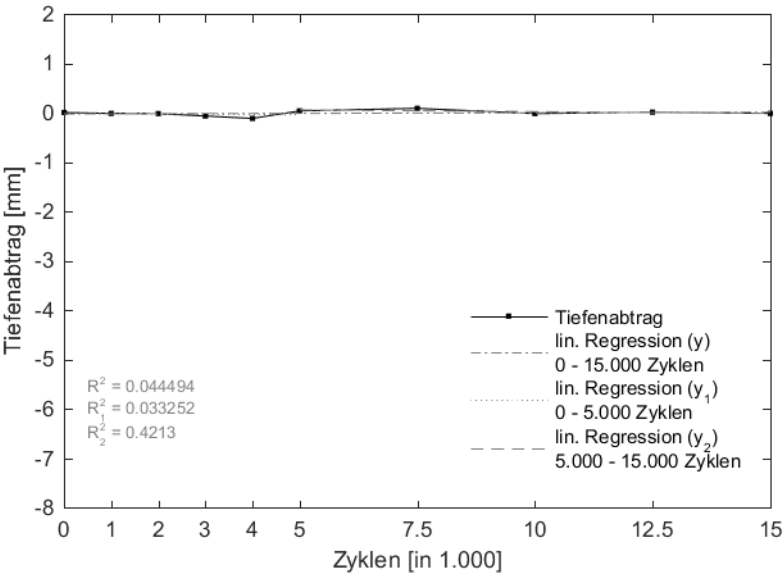


Abb. 8.29: P5\_BCA: Maximale Verschleißtiefe

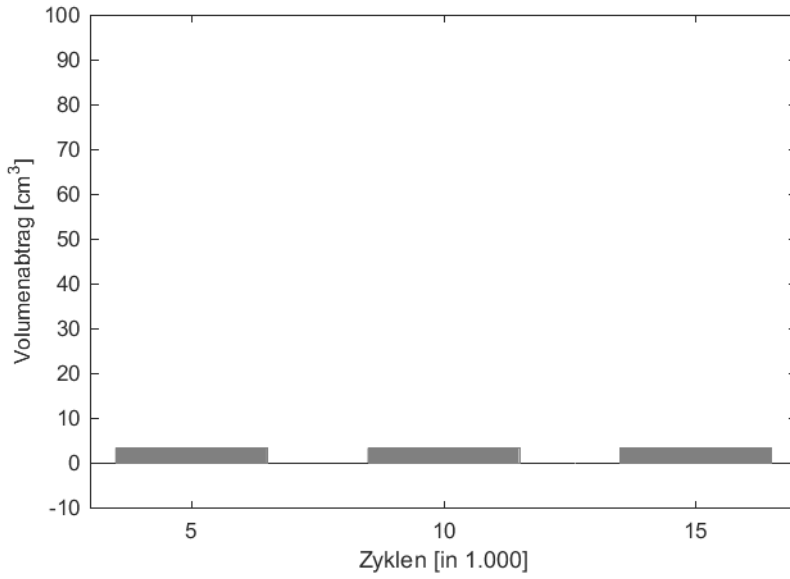


Abb. 8.30: P5\_PAT: Volumenabtrag

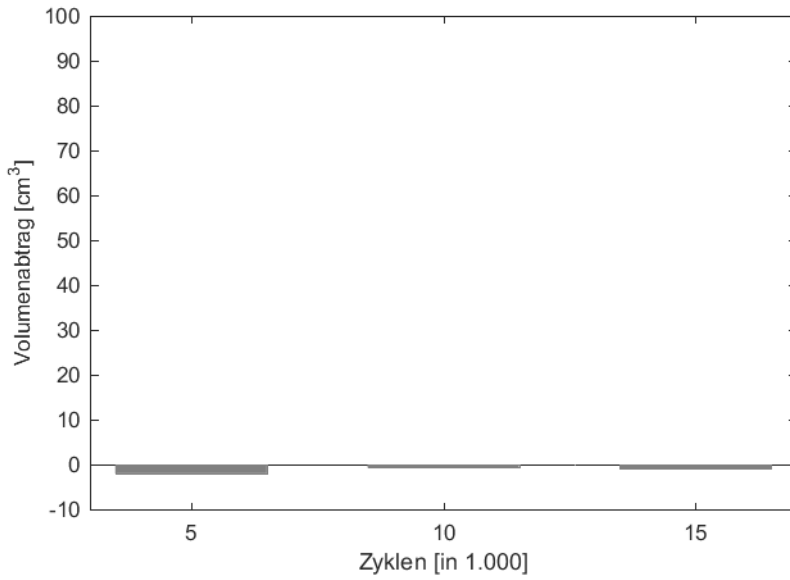
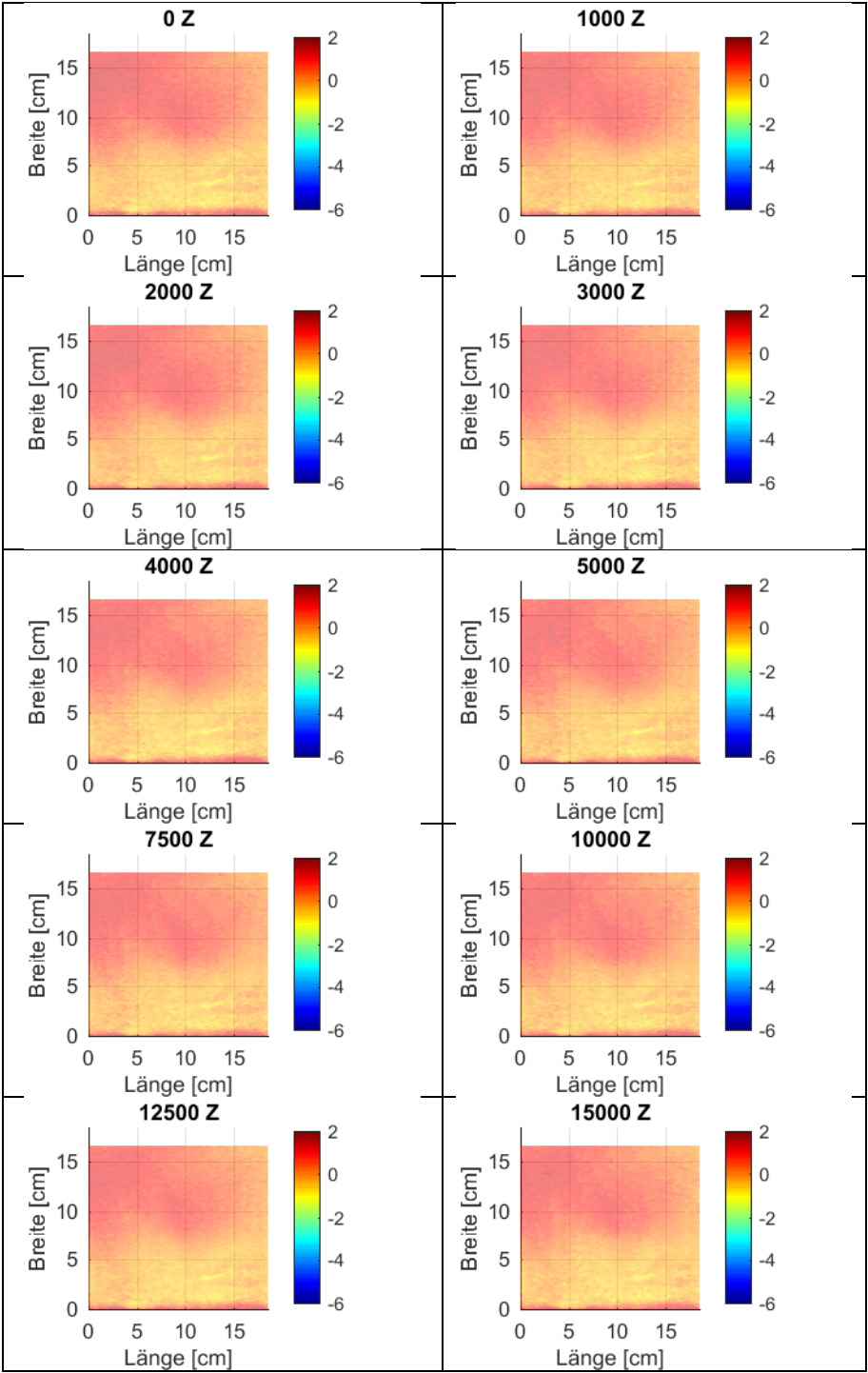
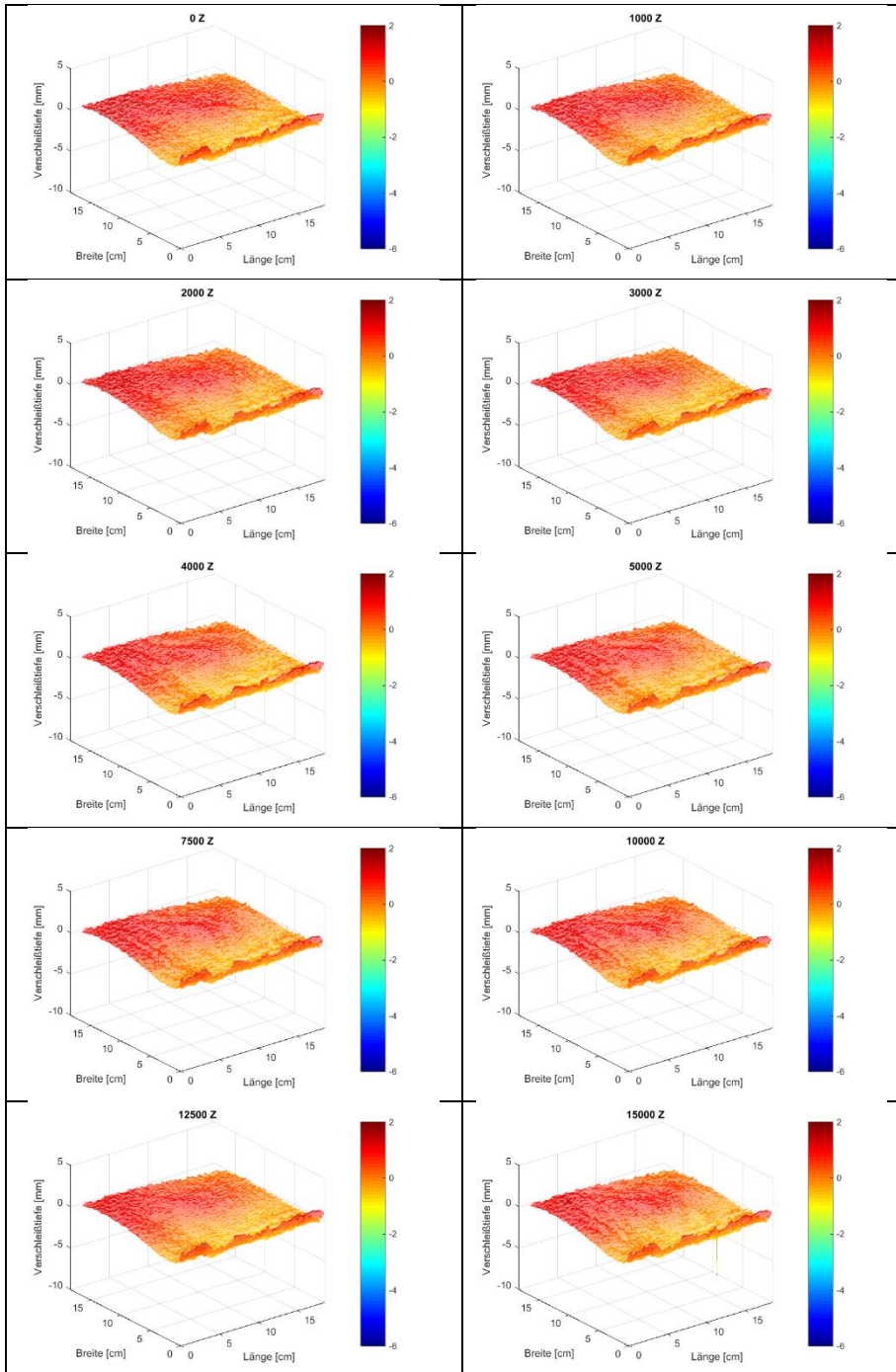


Abb. 8.31: P5\_BCA: Volumenabtrag

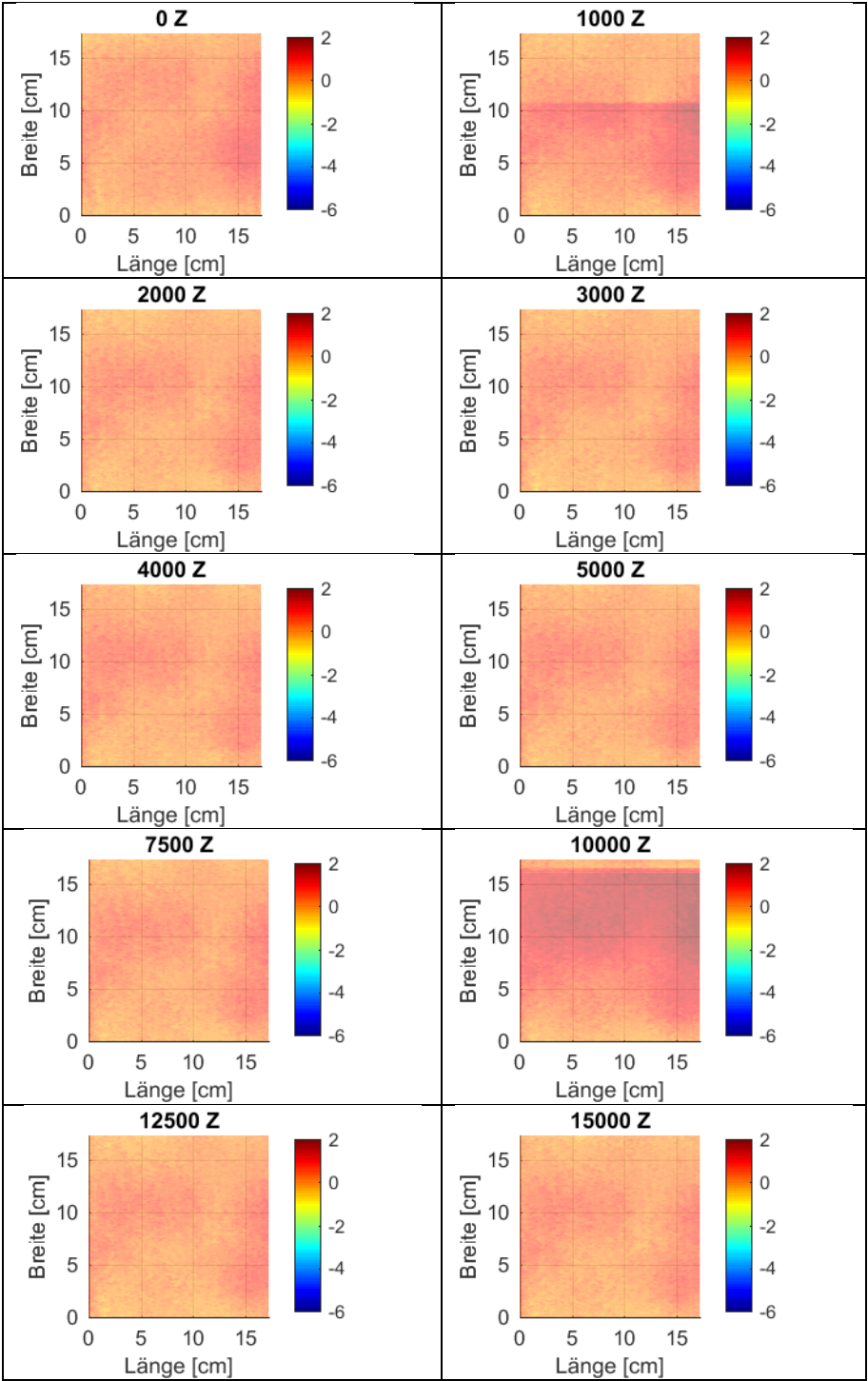
Tab. 8.36: P6\_PAT: Laserauswertung Draufsicht



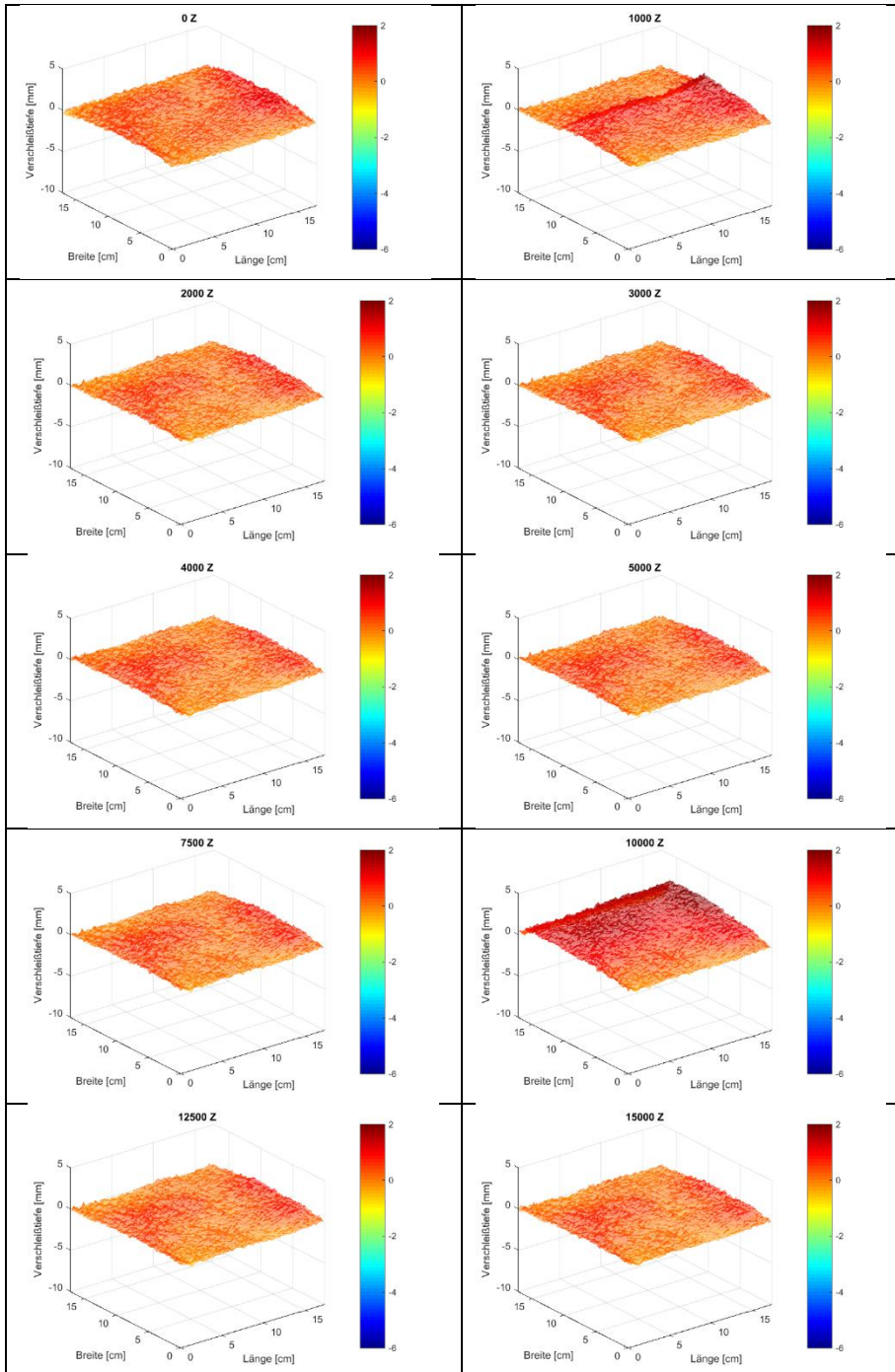
Tab. 8.37: P6\_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht




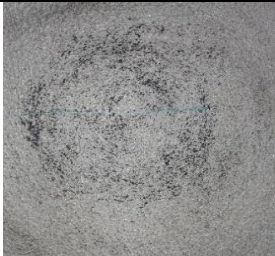
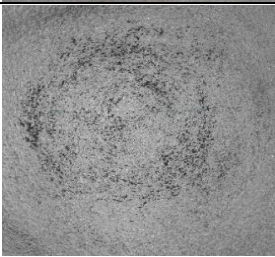

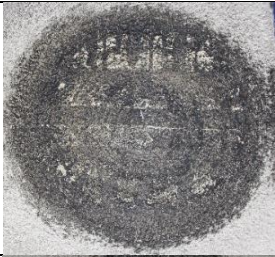
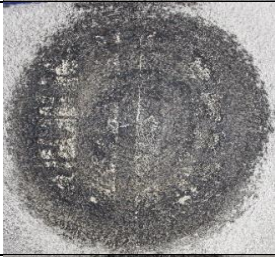


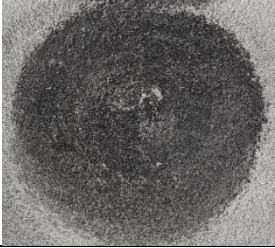

Tab. 8.38: P6\_BCA: Laserauswertung Draufsicht



Tab. 8.39: P6\_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht


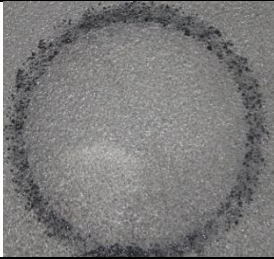
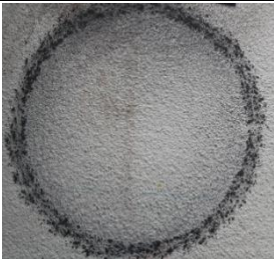



Tab. 8.40: P6\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z
7.500 Z					10.000 Z
12.500 Z					15.000 Z



Tab. 8.41: P6\_BCA: Fotografische Auswertung

0 Z				5.000 Z
10.000 Z				15.000 Z

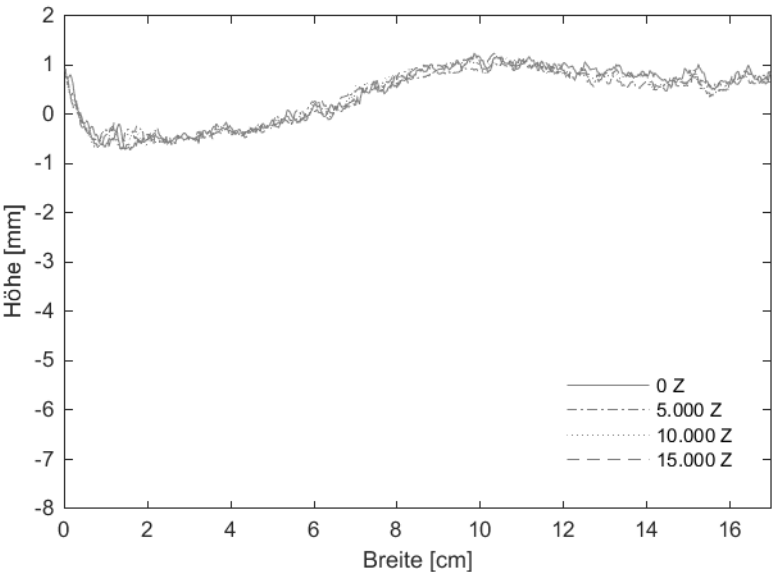


Abb. 8.32: P6\_PAT: Querschnitt in Plattenmitte

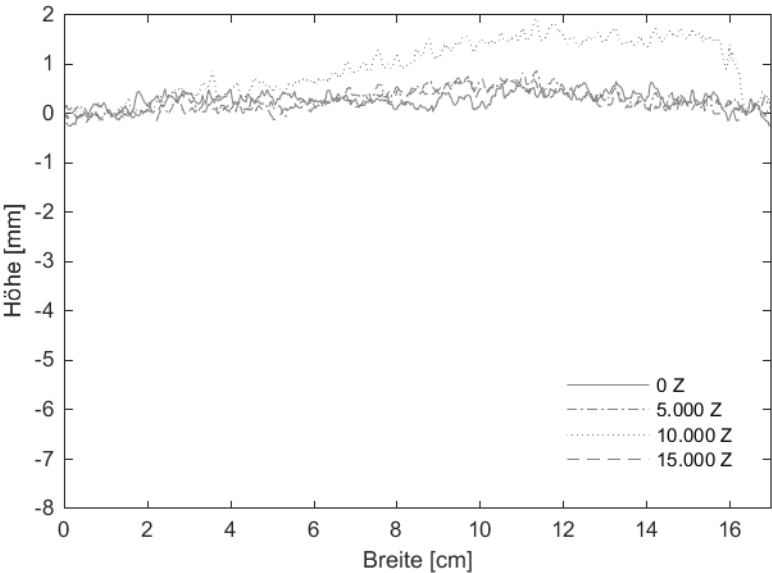


Abb. 8.33: P6\_BCA: Querschnitt in Plattenmitte

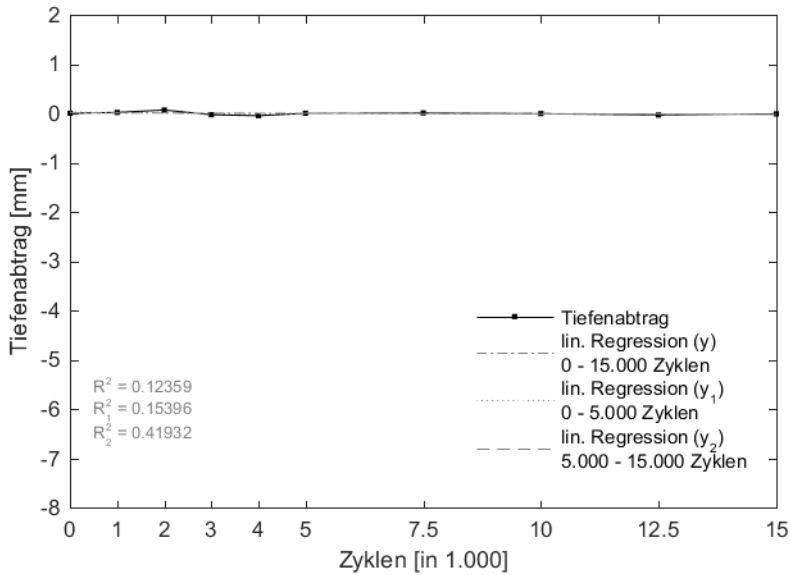


Abb. 8.34: P6\_PAT: Maximale Verschleißtiefe

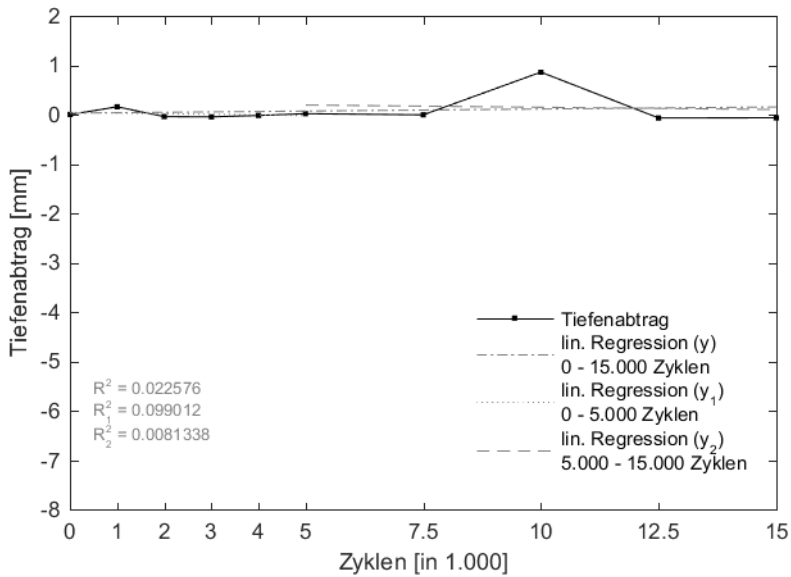


Abb. 8.35: P6\_BCA: Maximale Verschleißtiefe

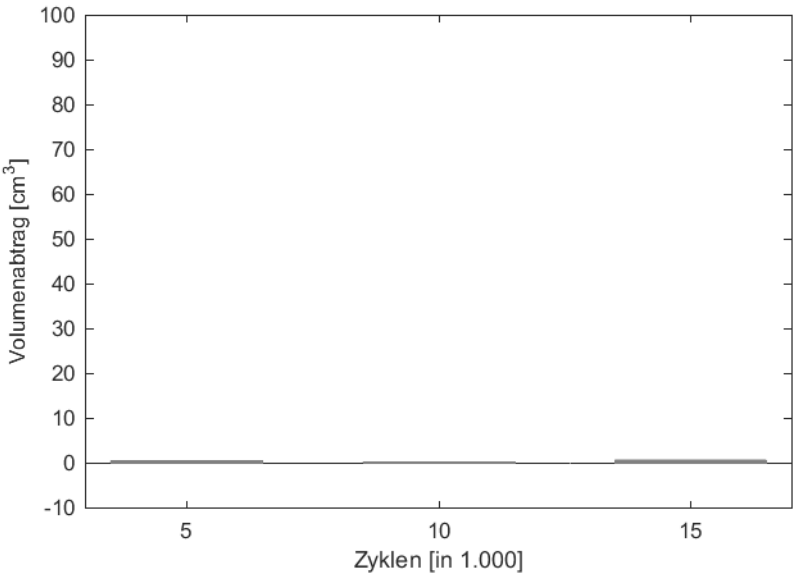


Abb. 8.36: P6\_PAT: Volumenabtrag

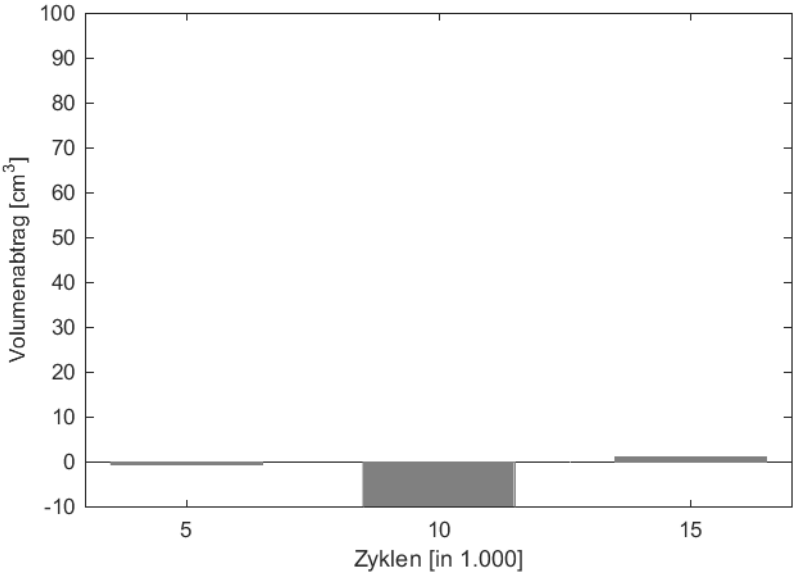
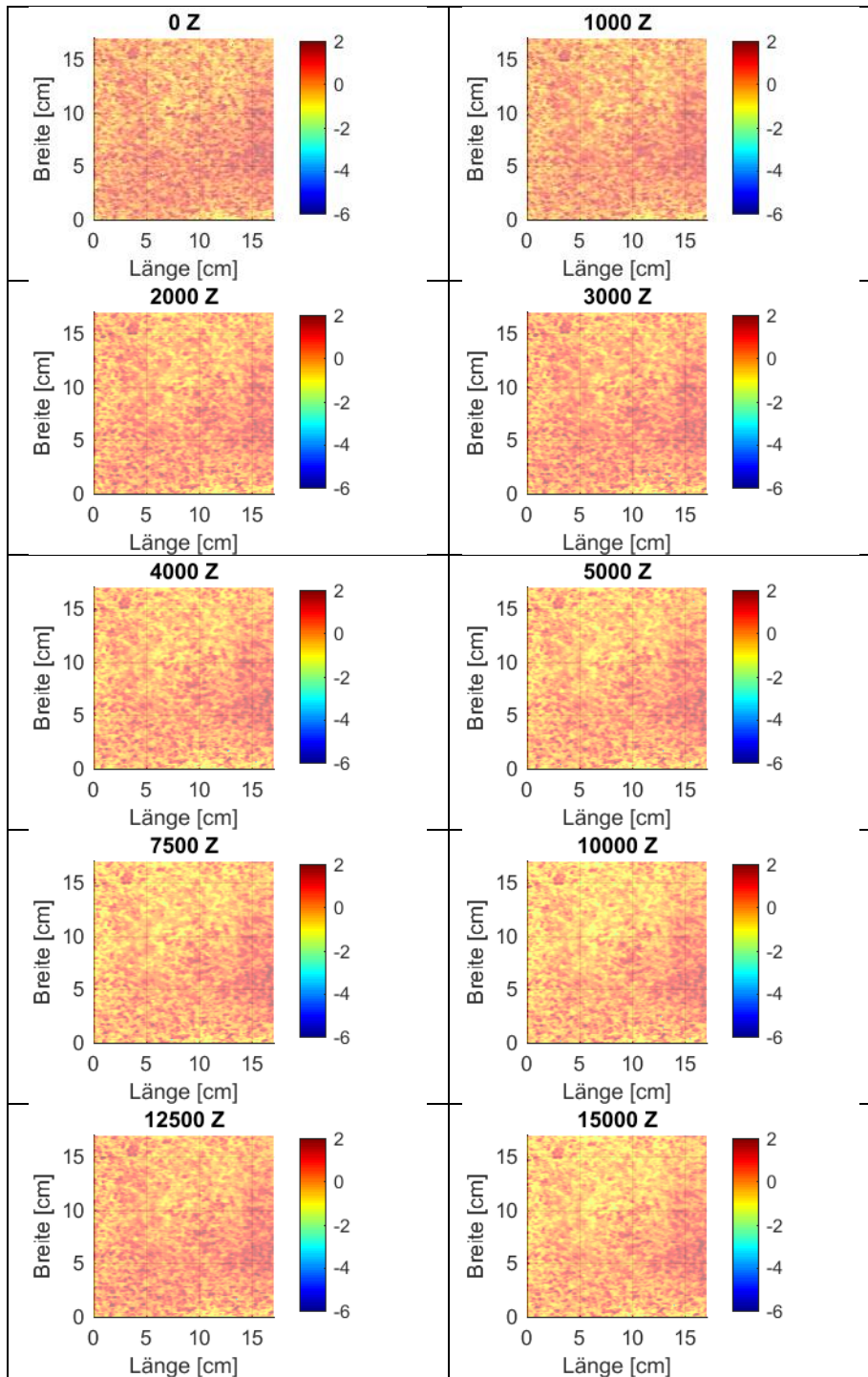
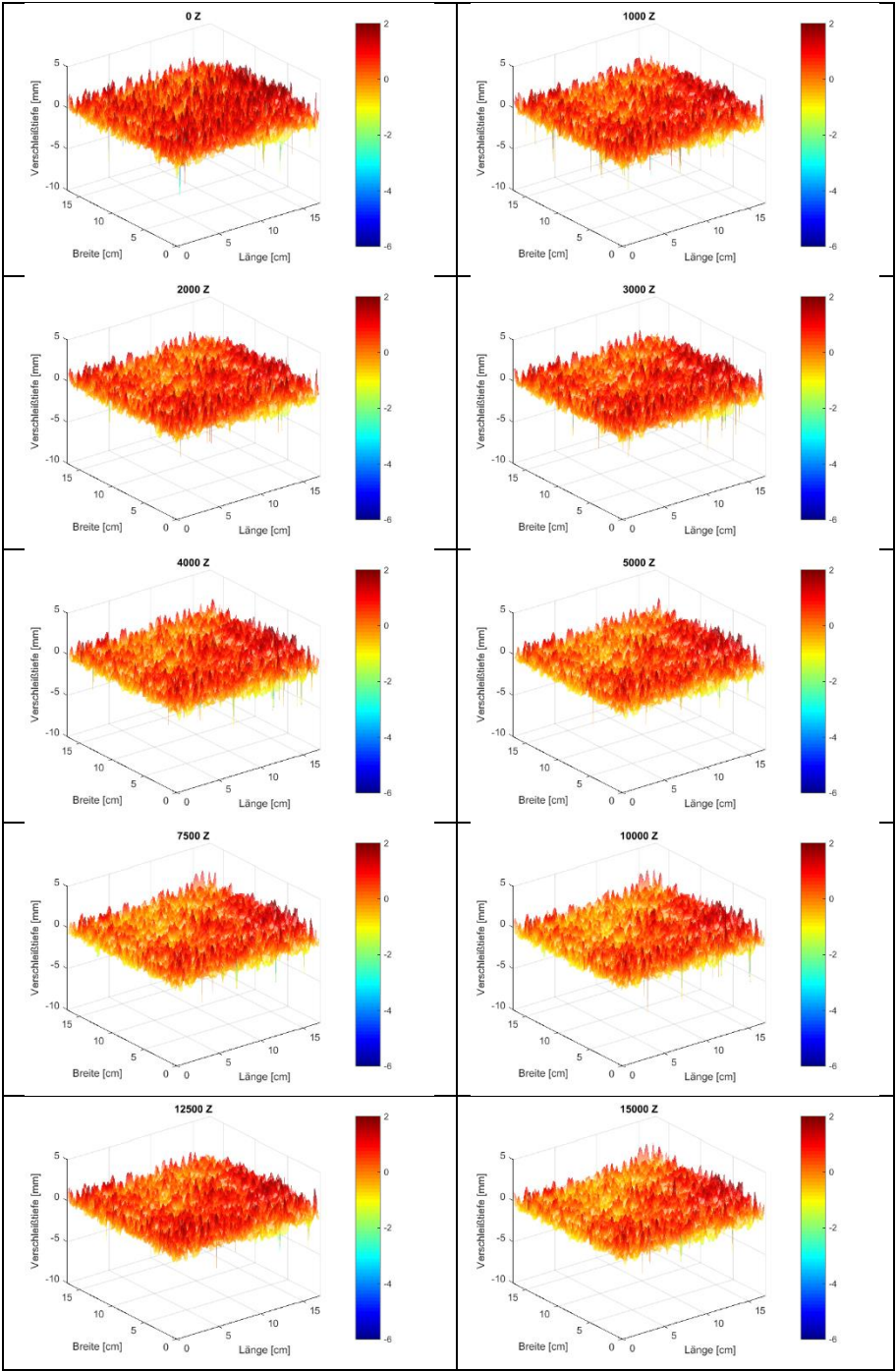


Abb. 8.37: P6\_BCA: Volumenabtrag

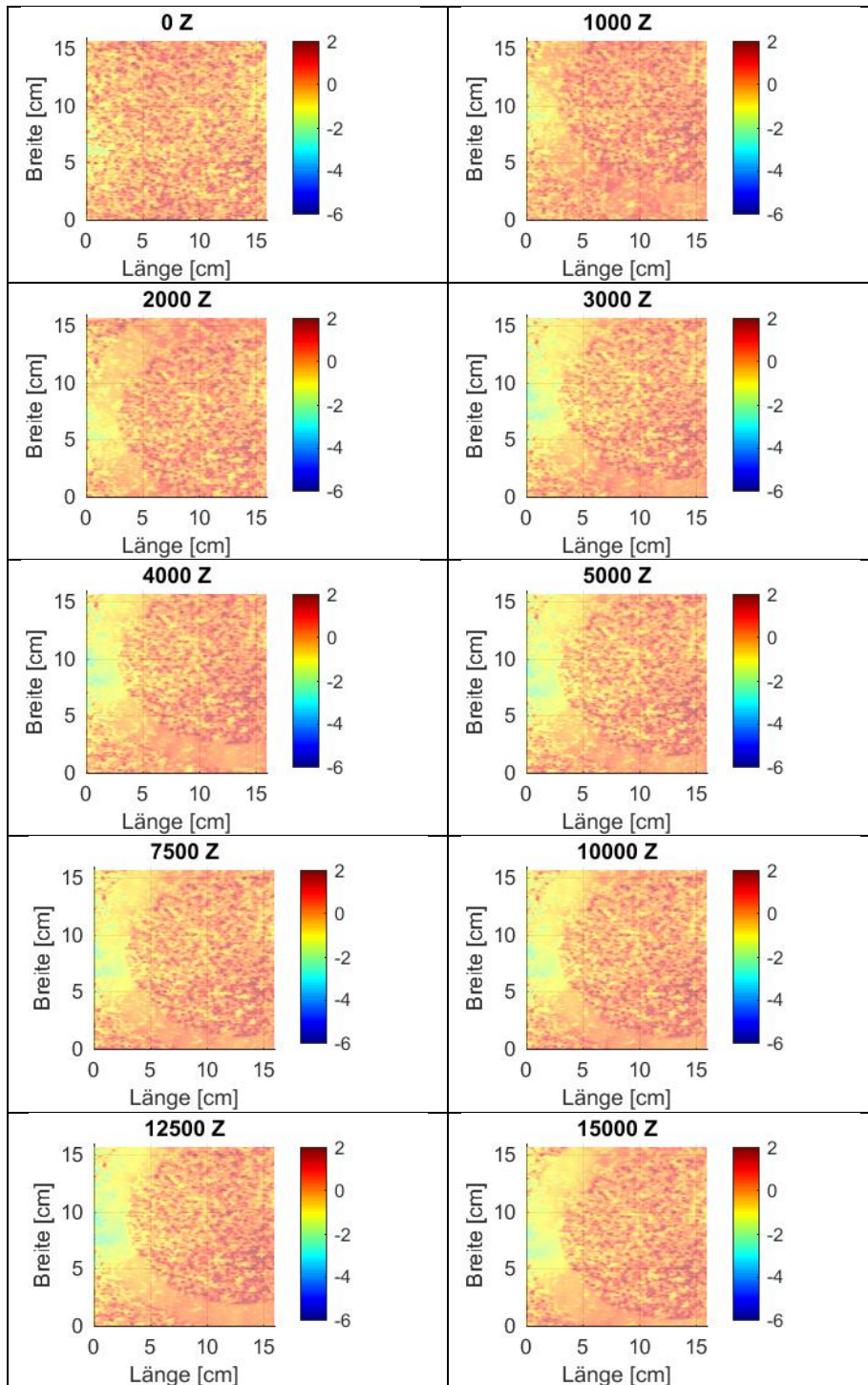
Tab. 8.42: P7\_PAT: Laserauswertung Draufsicht



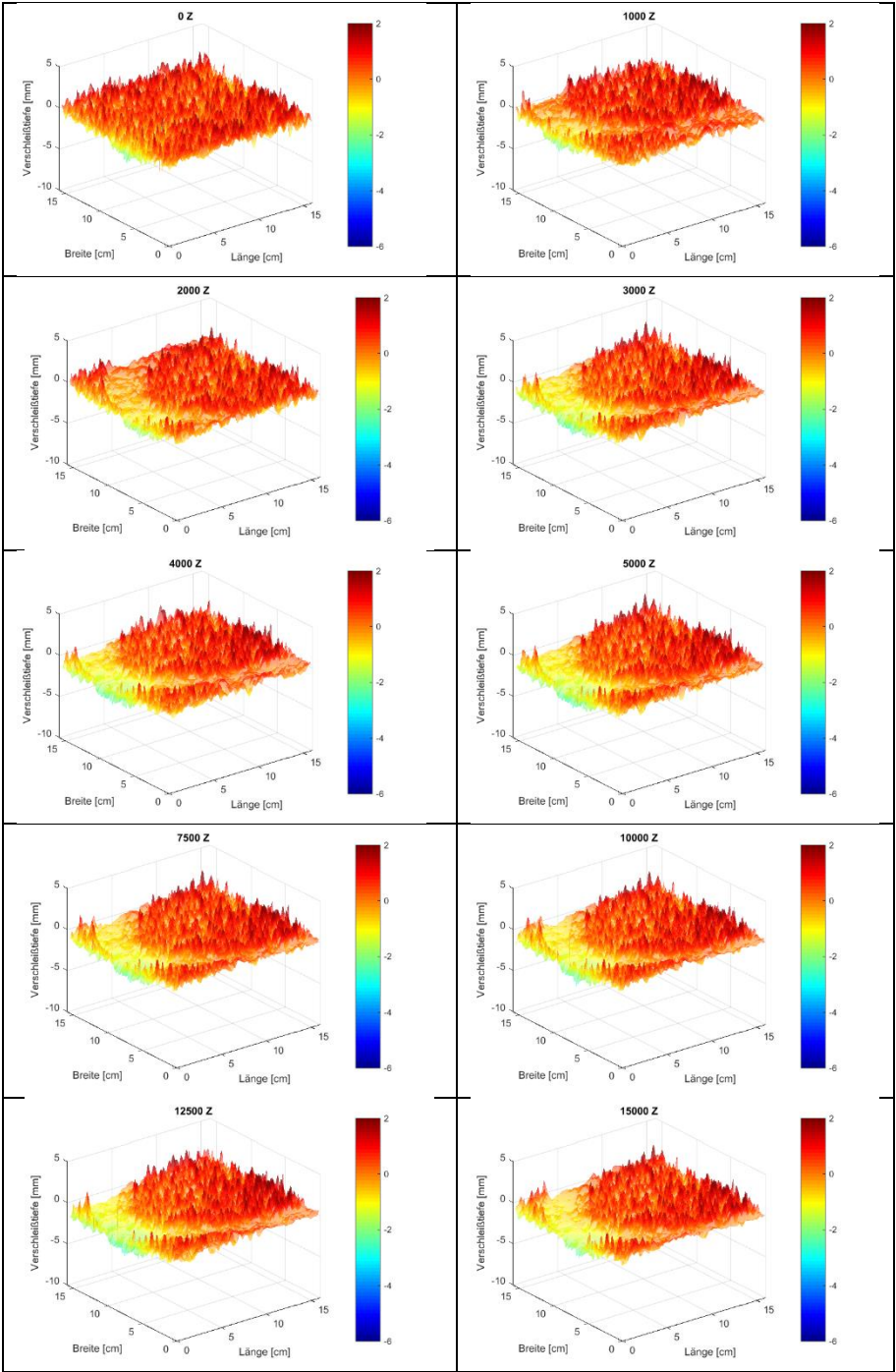
Tab. 8.43: P7\_PAT: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.44: P7\_BCA: Laserauswertung Draufsicht



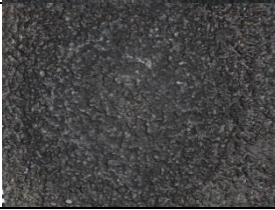



Tab. 8.45: P7\_BCA: Laserauswertung 3D-Ansicht



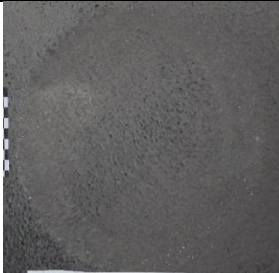



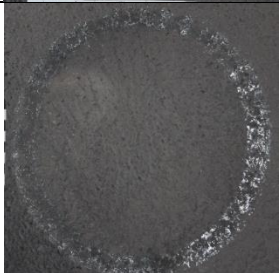

















Tab. 8.46: P7\_PAT: Fotografische Auswertung

0 Z							5.000 Z
10.000 Z							15.000 Z

Tab. 8.47: P7\_BCA: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z
7.500 Z					10.000 Z
12.500 Z					15.000 Z

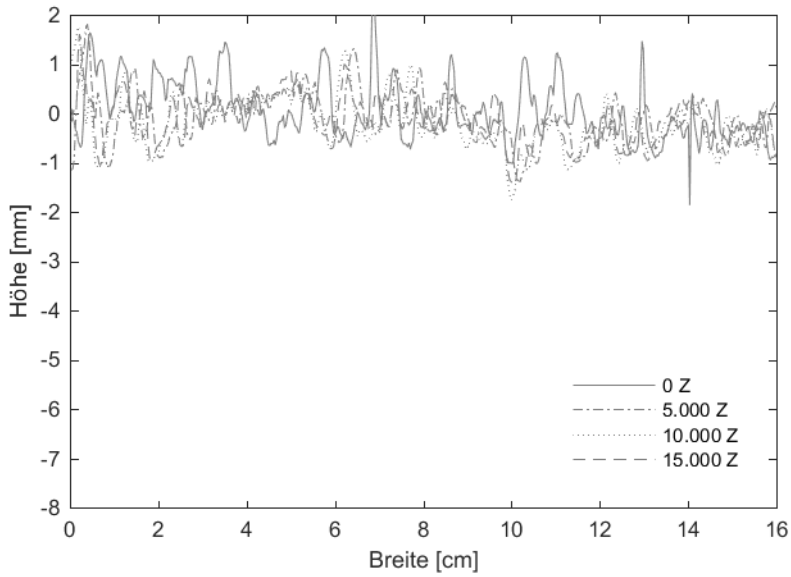


Abb. 8.38: P7\_PAT: Querschnitt in Plattenmitte

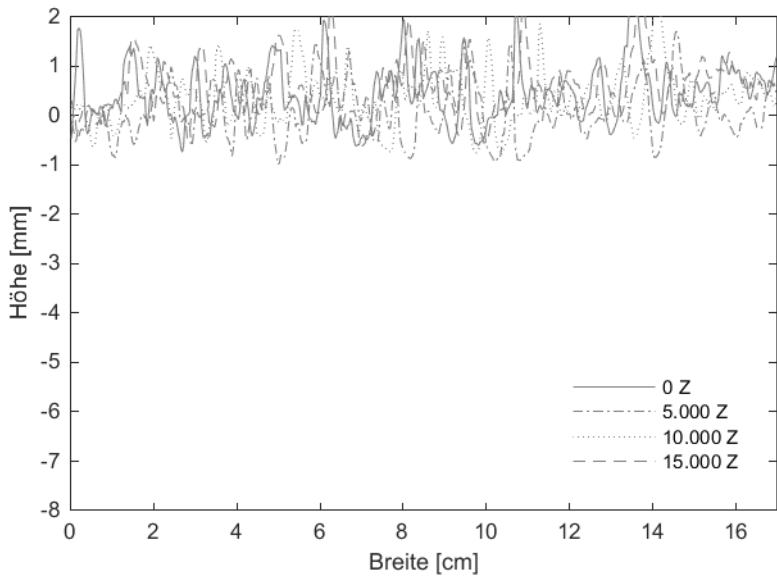


Abb. 8.39: P7\_BCA: Querschnitt in Plattenmitte

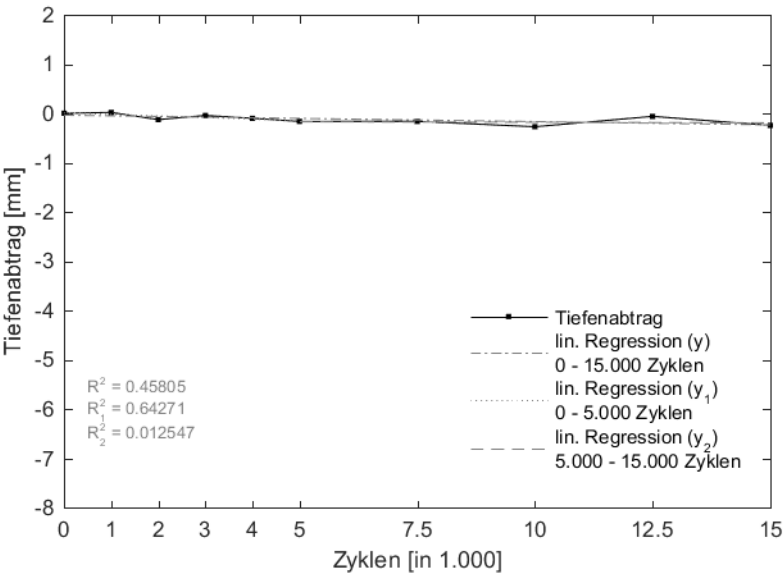


Abb. 8.40: P7\_PAT: Maximale Verschleißtiefe

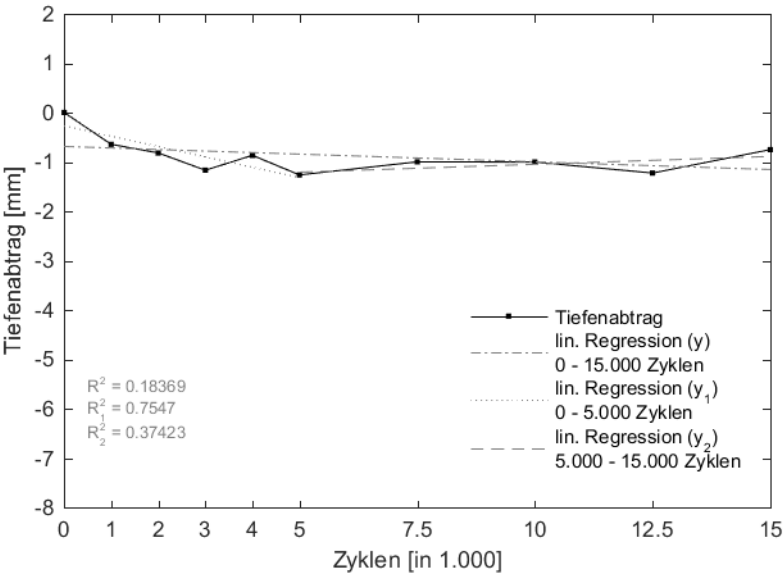


Abb. 8.41: P7\_BCA: Maximale Verschleißtiefe

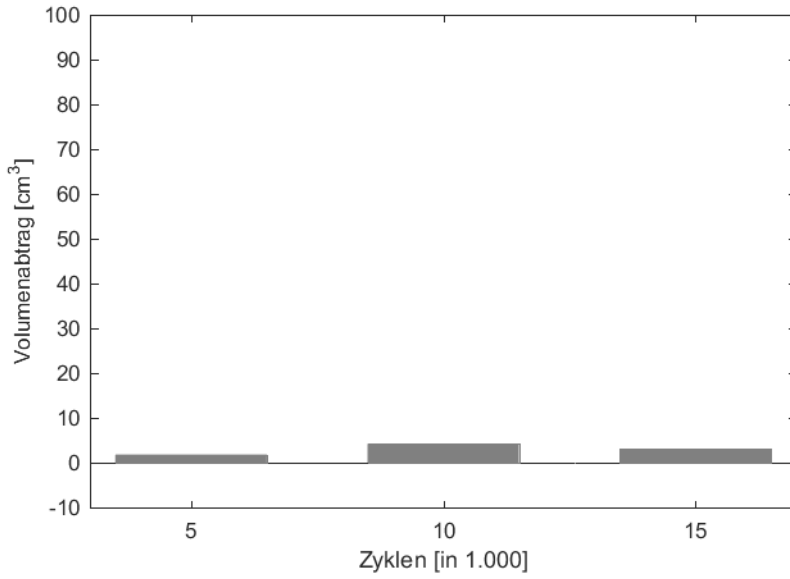


Abb. 8.42: P7\_PAT: Volumenabtrag

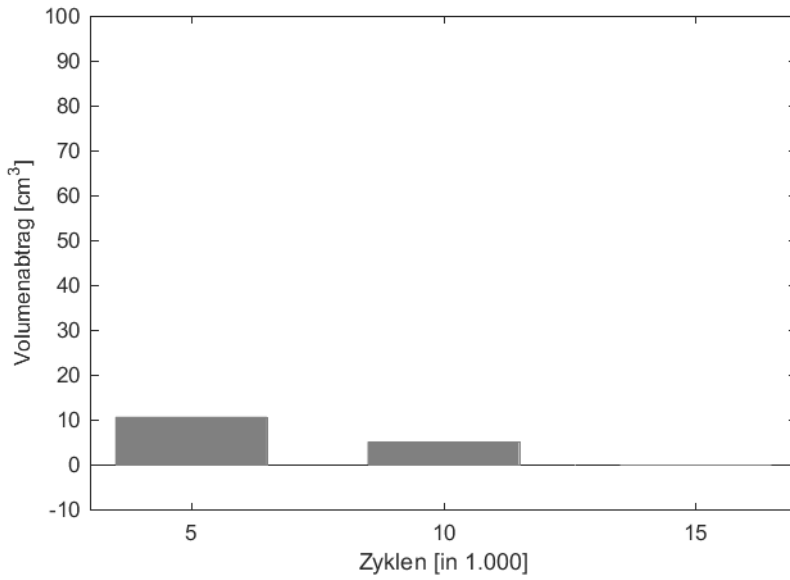


Abb. 8.43: P7\_BCA: Volumenabtrag

## Anhang D



Abb. 8.44: Aufstandsfläche 165/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 1)

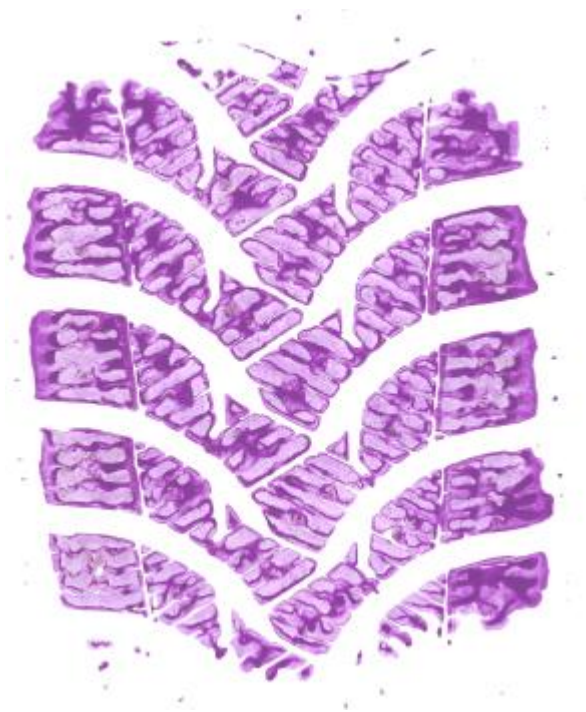


Abb. 8.45: Aufstandsfläche 165/65 R15 (Winterreifen, Nr.2)

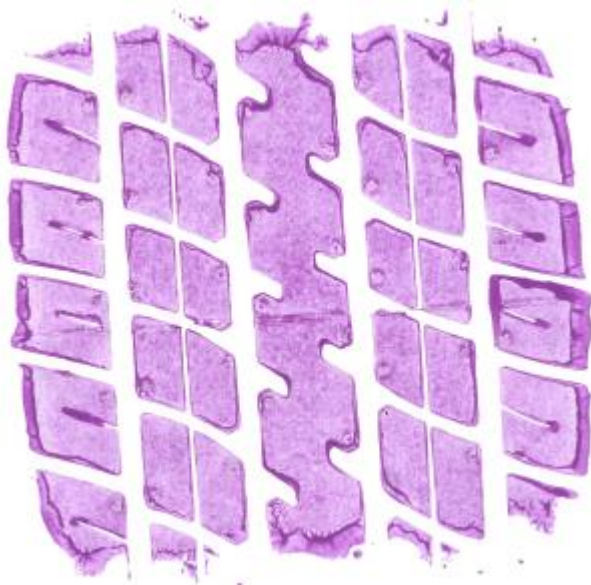


Abb. 8.46: Aufstandsfläche 175/55 R15 (Sommerreifen, Nr. 3)

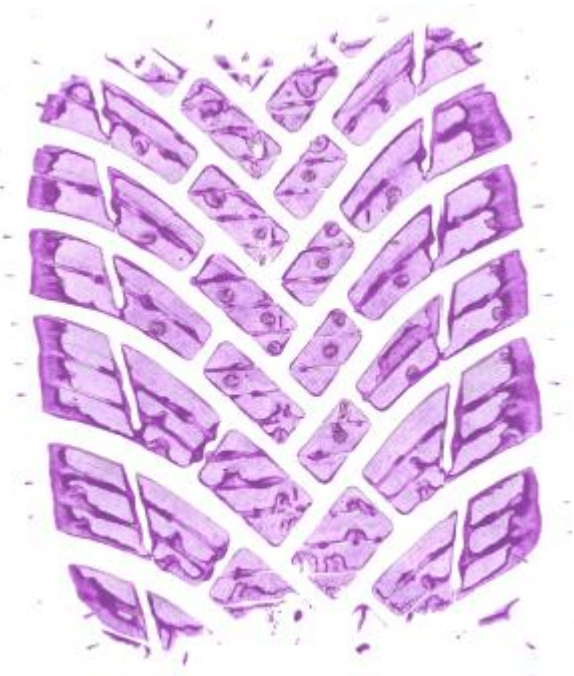


Abb. 8.47: Aufstandsfläche 175/60 R15 (Winterreifen, Nr. 4)



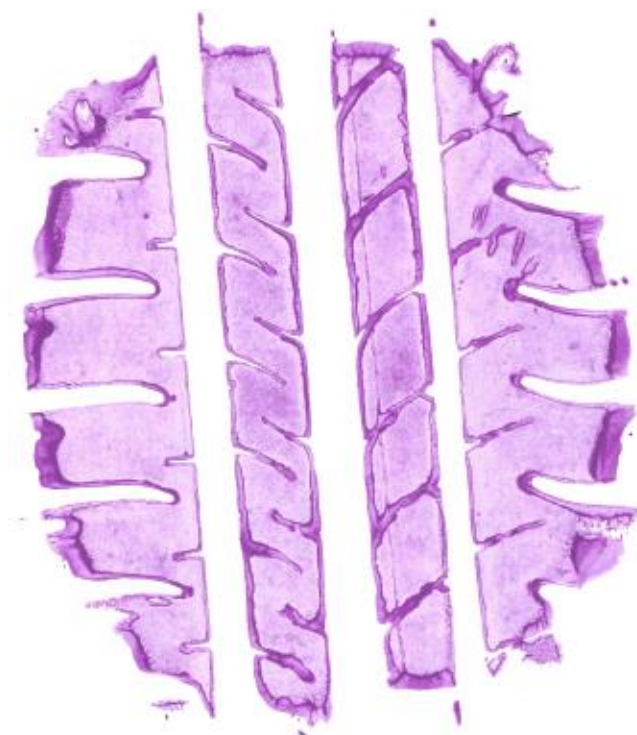


Abb. 8.48: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 5)

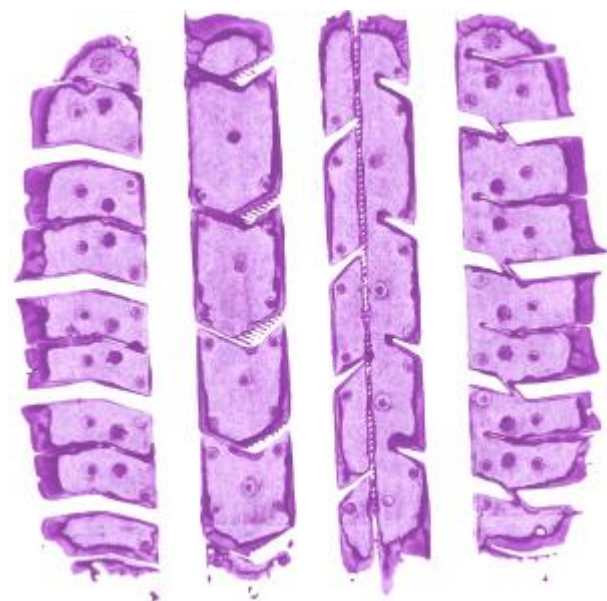


Abb. 8.49: Aufstandsfläche 196/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 6)





Abb. 8.50: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Sommerreifen, Nr. 7)

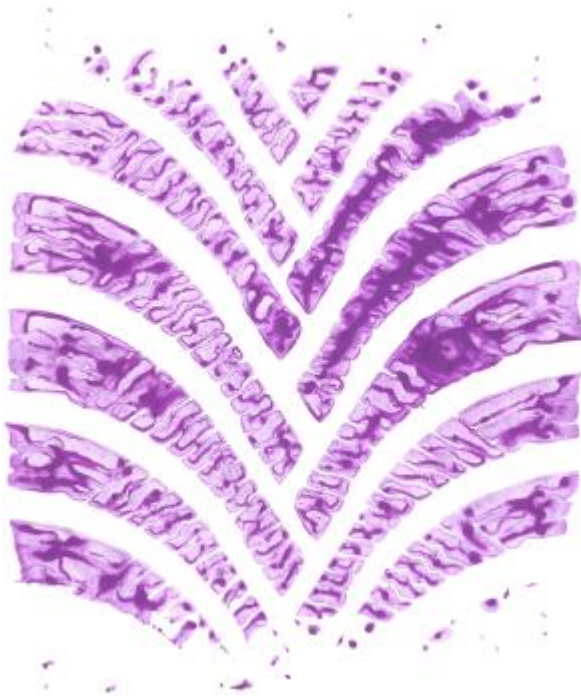


Abb. 8.51: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Winterreifen, Nr. 8)

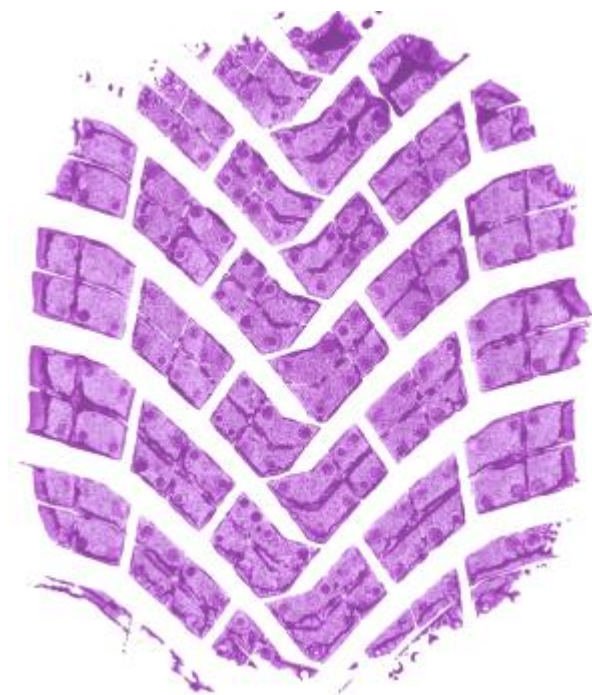


Abb. 8.52: Aufstandsfläche 195/65 R15 (Allwetter, Nr. 9)



Abb. 8.53: Aufstandsfläche 205/50 R15 (Sommerreifen, Nr. 10)

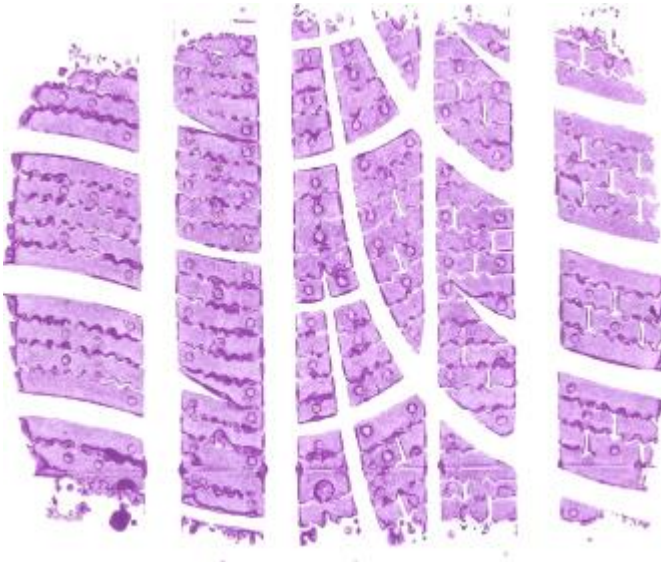


Abb. 8.54: Aufstandsfläche 205/50 R15 (Winterreifen, Nr. 11)



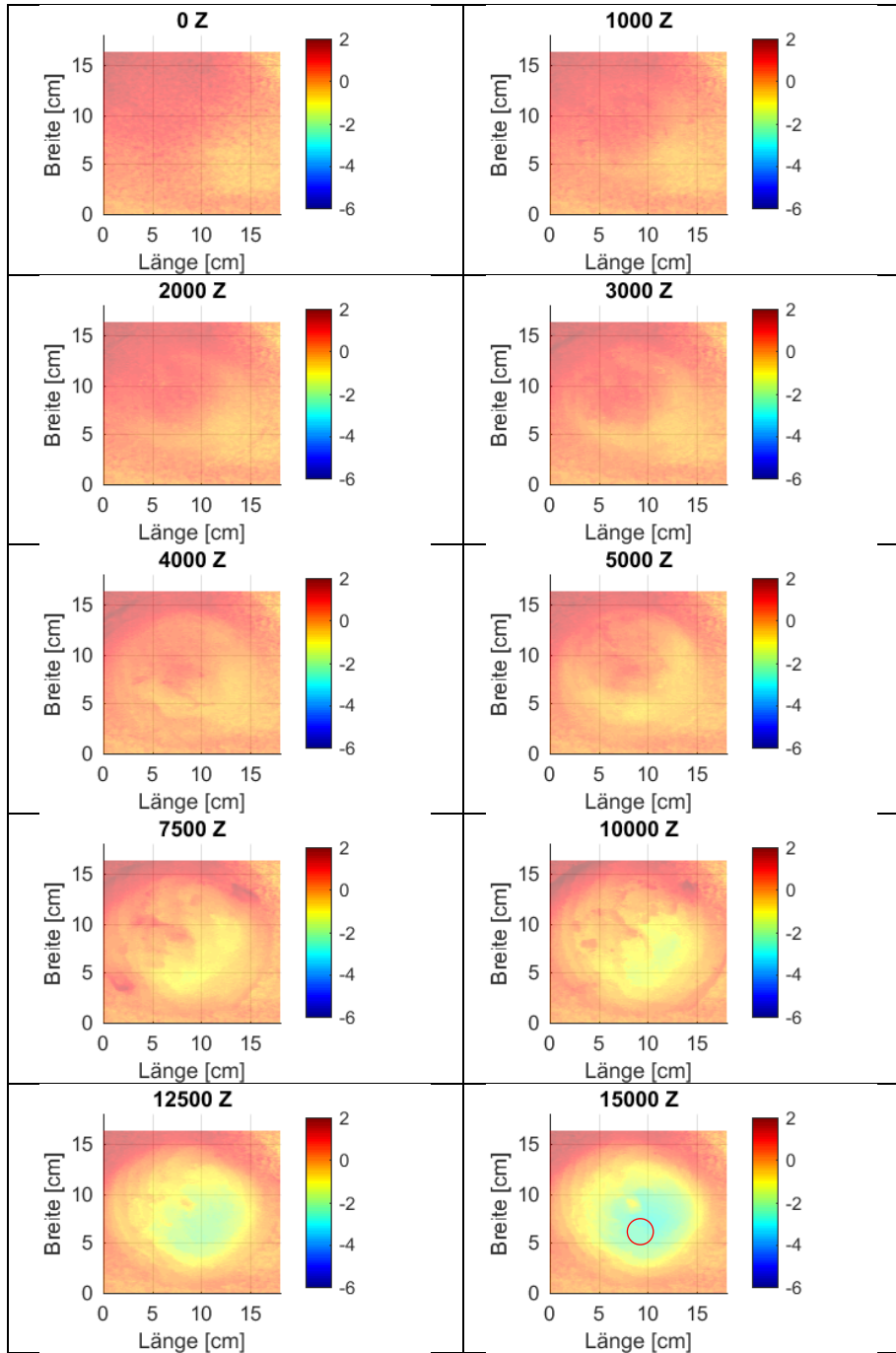
Abb. 8.55: Aufstandsfläche 215/60 R15 (Sommerreifen, Nr. 12)



Abb. 8.56: Aufstandsfläche 215/60 R15 (Winterreifen, Nr. 13)

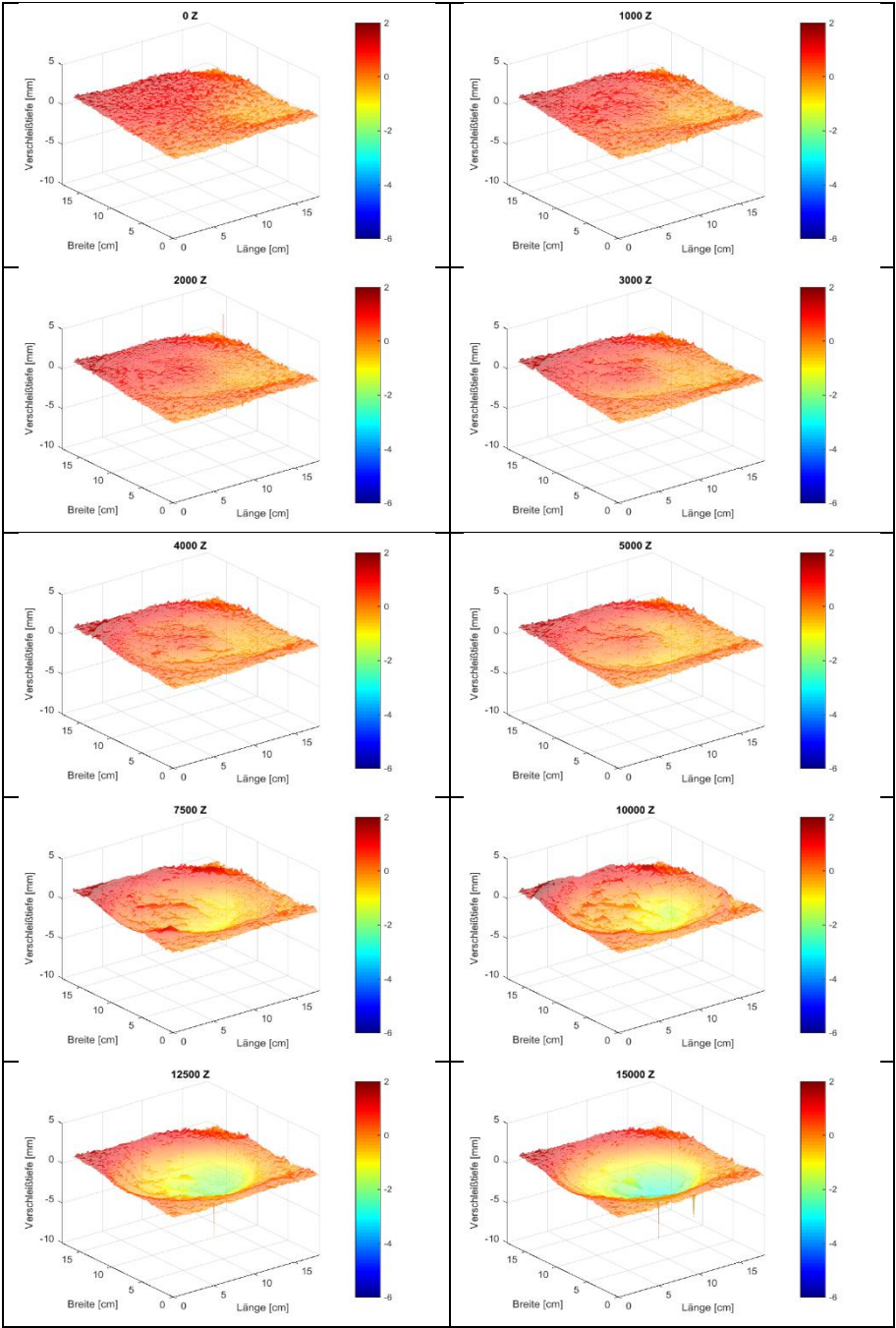
## Anhang E

Tab. 8.48: P1\_versiegelt: Laserauswertung Draufsicht

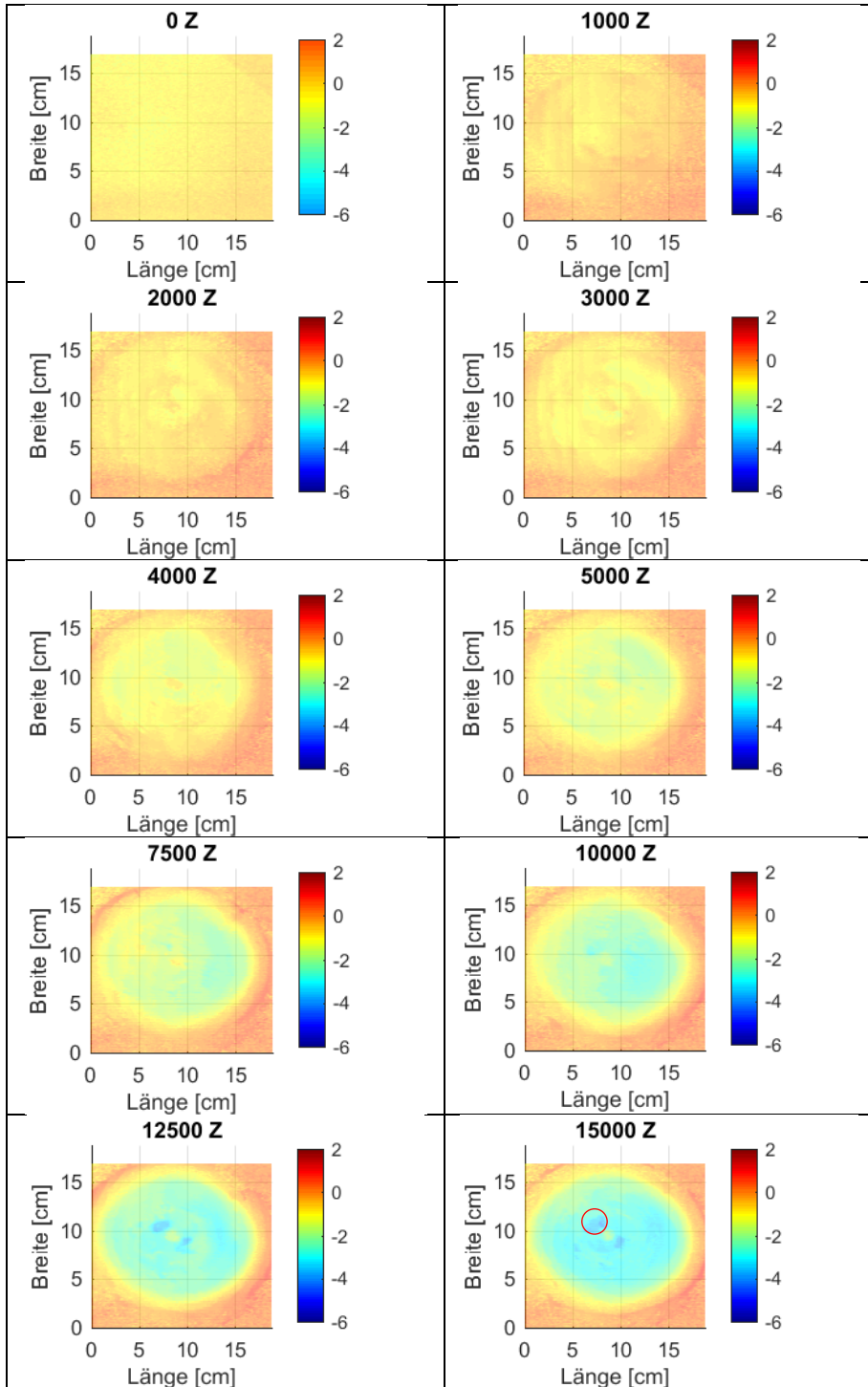




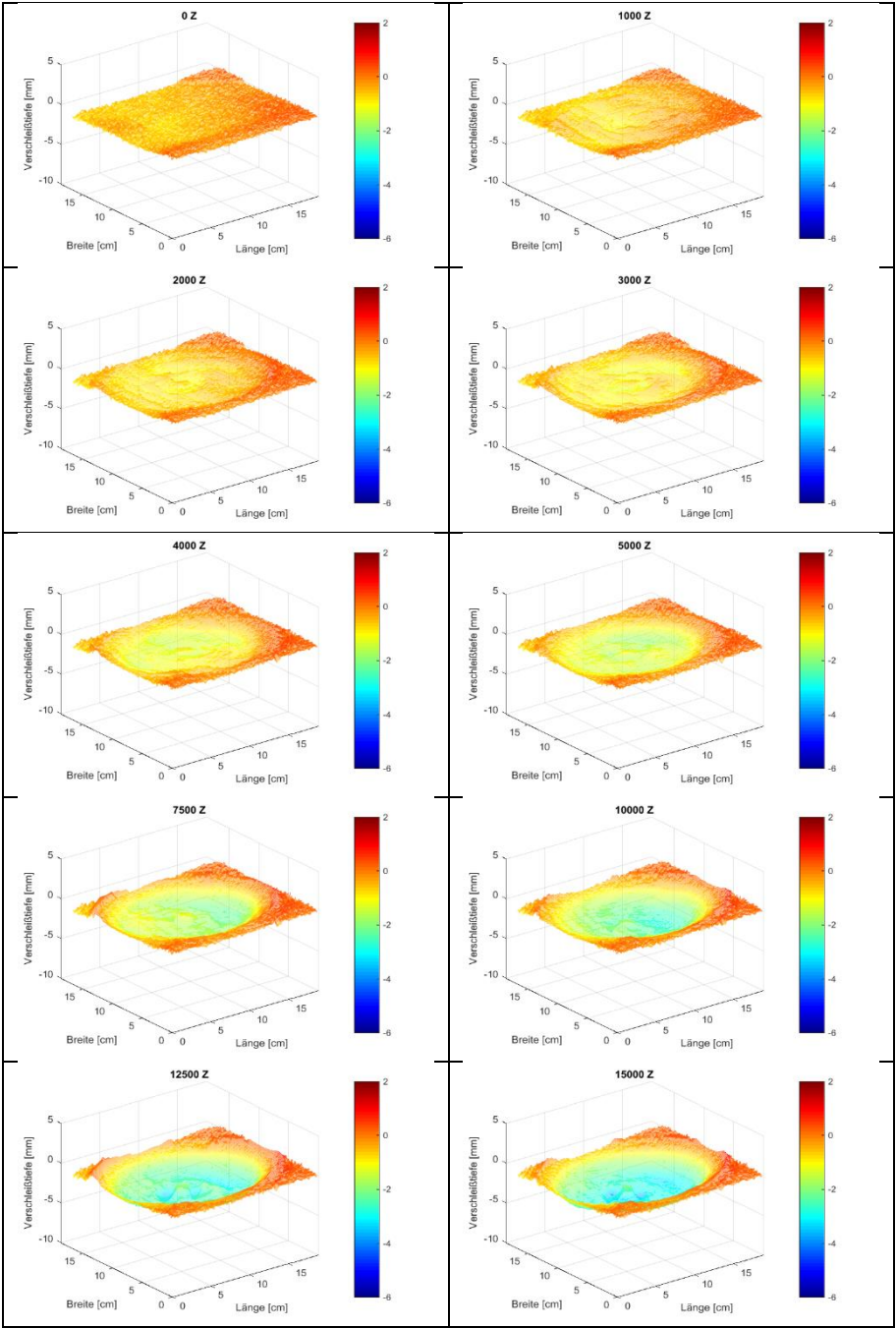
Tab. 8.49: P1\_versiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.50: P1\_unversiegelt: Laserauswertung Draufsicht


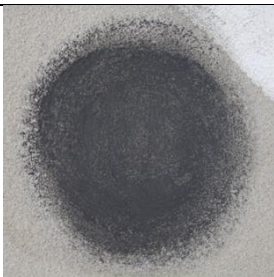

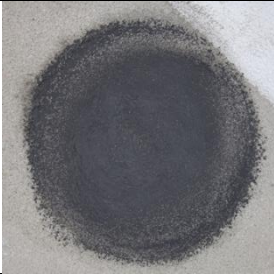

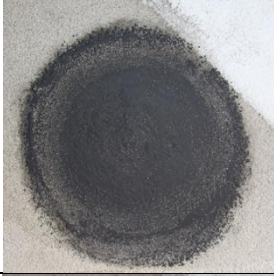
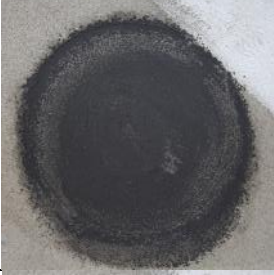

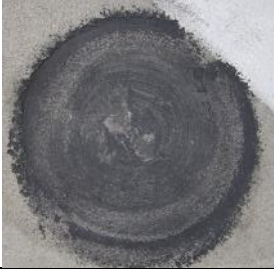



Tab. 8.51: P1\_unversiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht



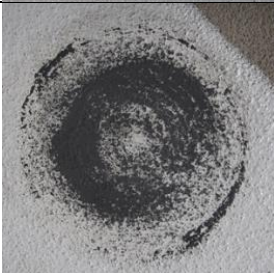
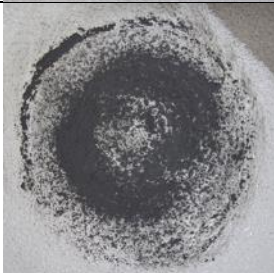

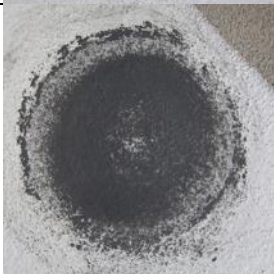
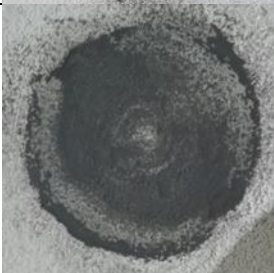

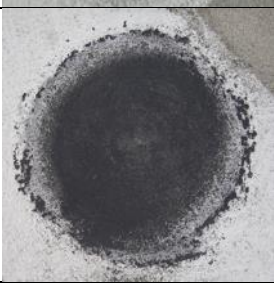
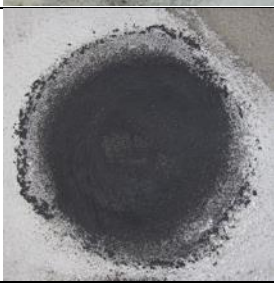




Tab. 8.52: P1\_unversiegelt: Fotografische Auswertung

0 Z				1.000 Z
2.000 Z				3.000 Z
4.000 Z				5.000 Z
7.500 Z				10.000 Z
12.500 Z				15.000 Z

Tab. 8.53: P1\_versegelt: Fotografische Auswertung

0 Z						1.000 Z
2.000 Z						3.000 Z
4.000 Z						5.000 Z
7.500 Z						10.000 Z
12.500 Z						15.000 Z

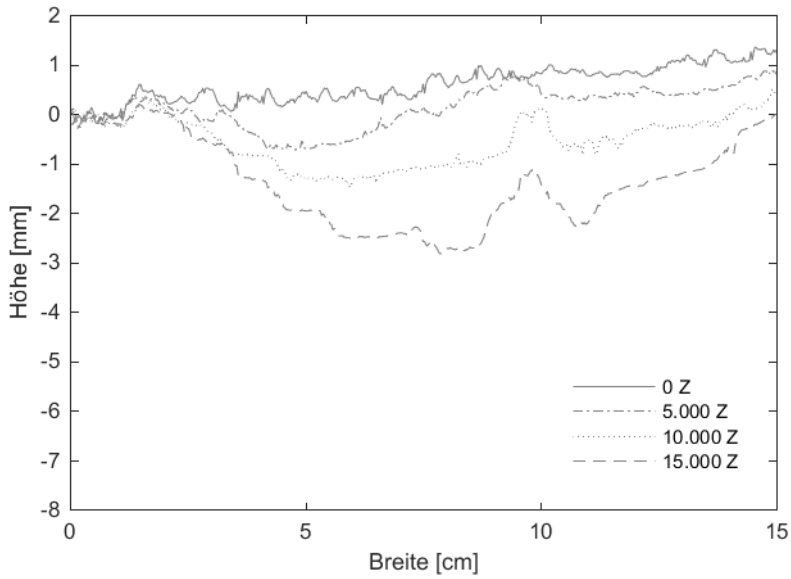


Abb. 8.57: P1\_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte

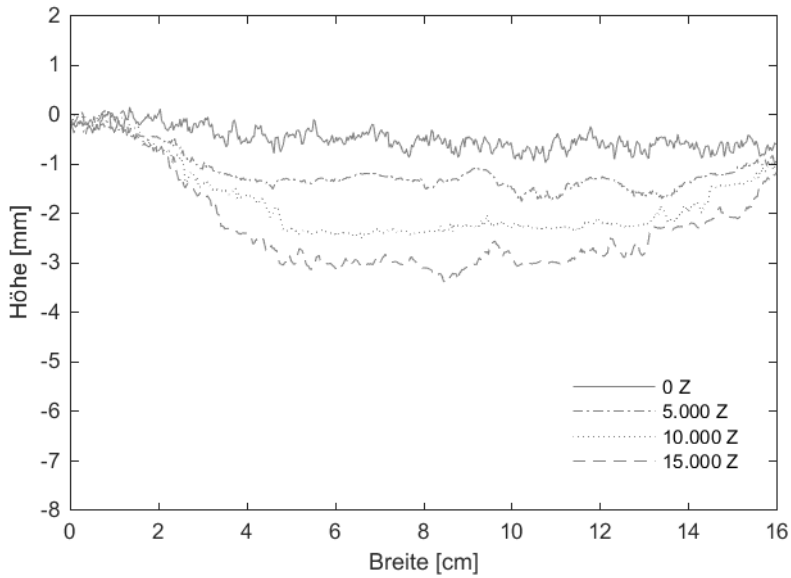


Abb. 8.58: P1\_unversiegelt: Querschnitt in Plattenmitte

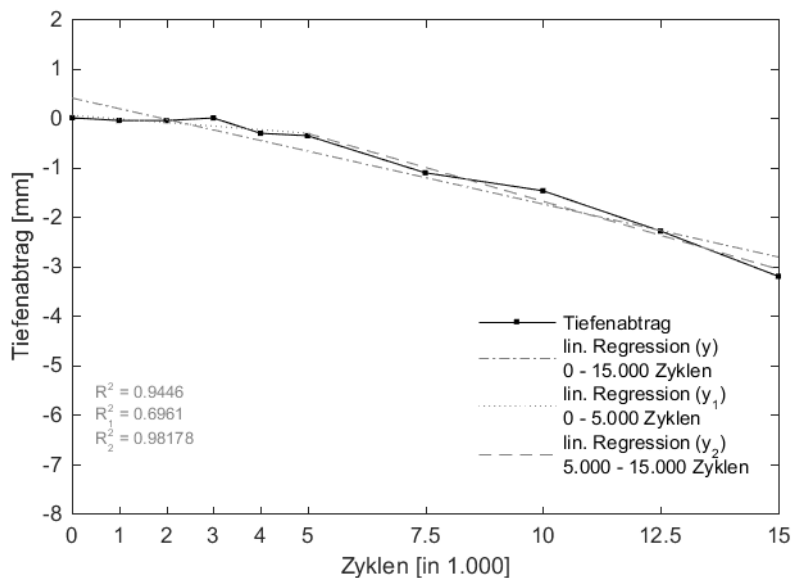


Abb. 8.59: P1\_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte

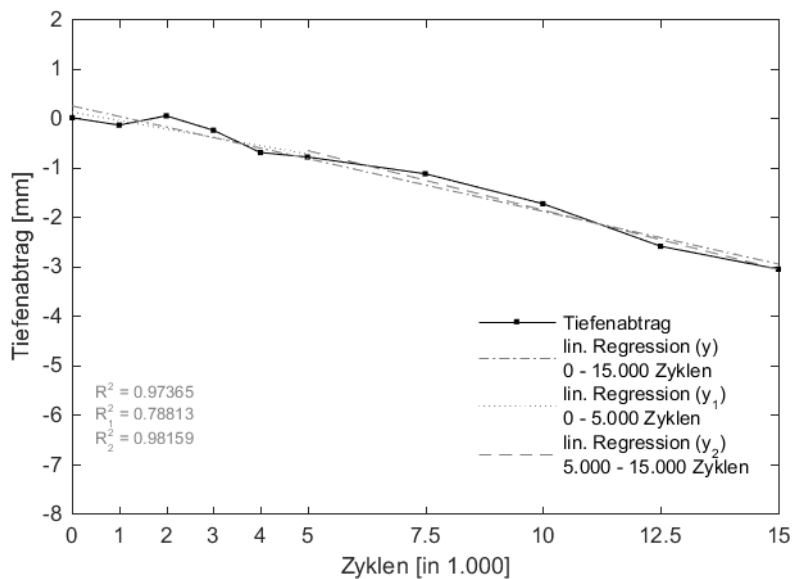


Abb. 8.60: P1\_unversiegelt: Maximale Verschleißtiefe

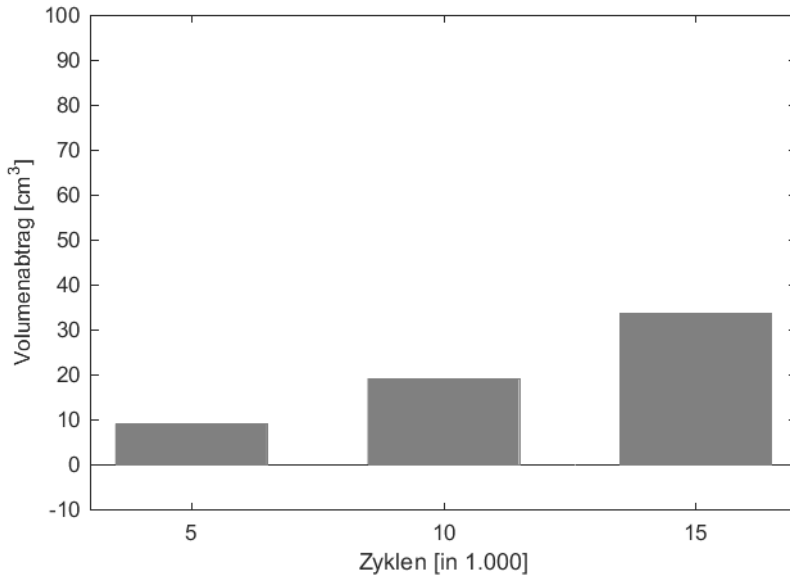


Abb. 8.61: P1\_versiegelt: Volumenabtrag

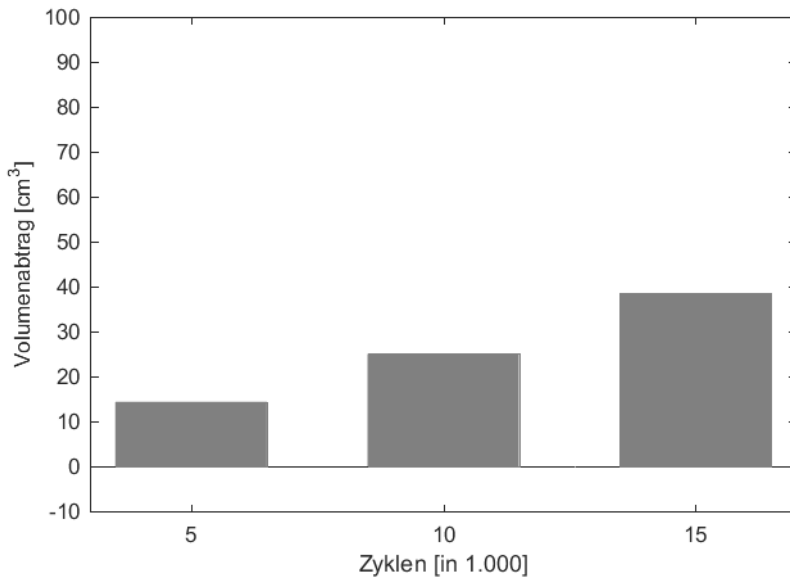
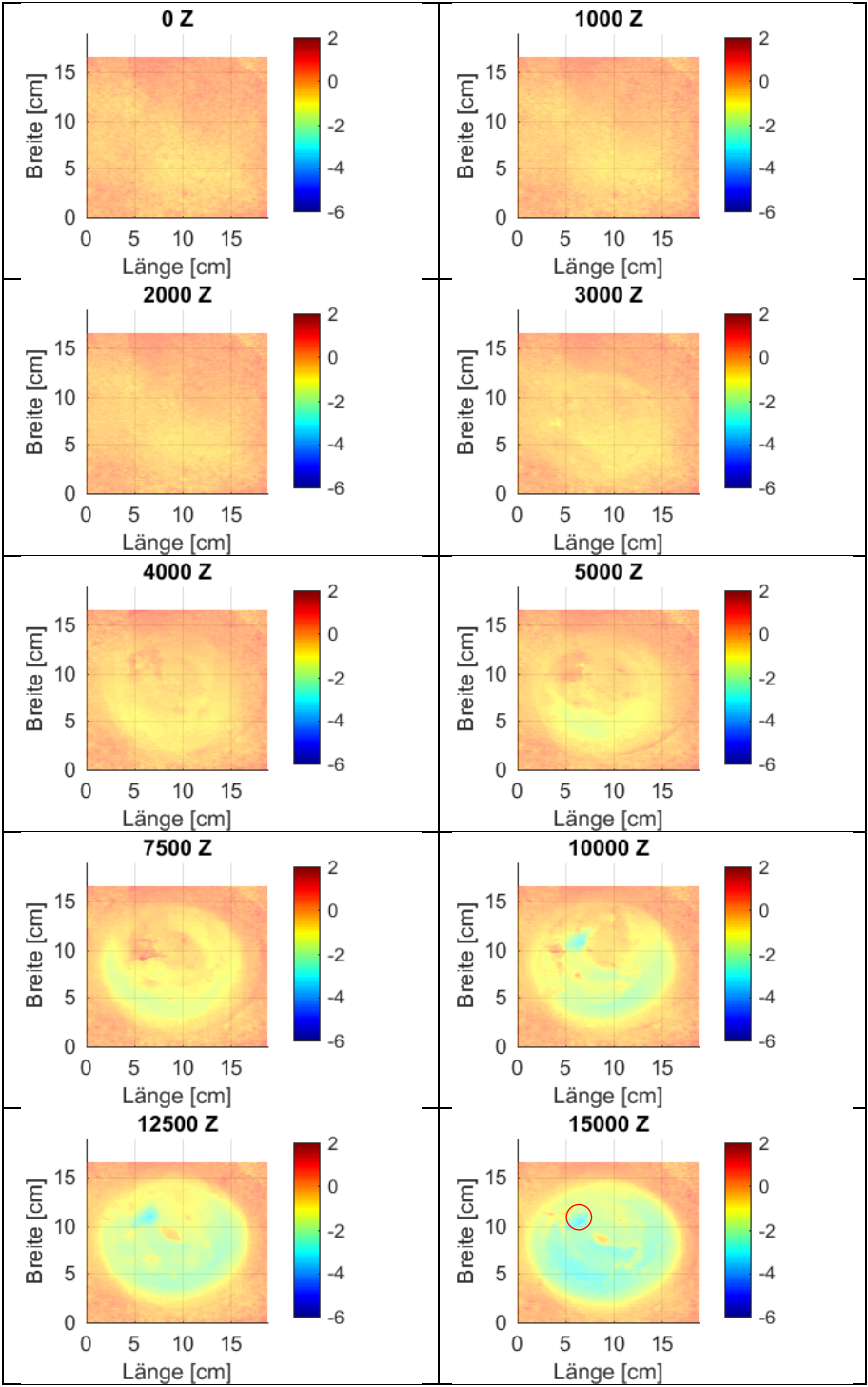
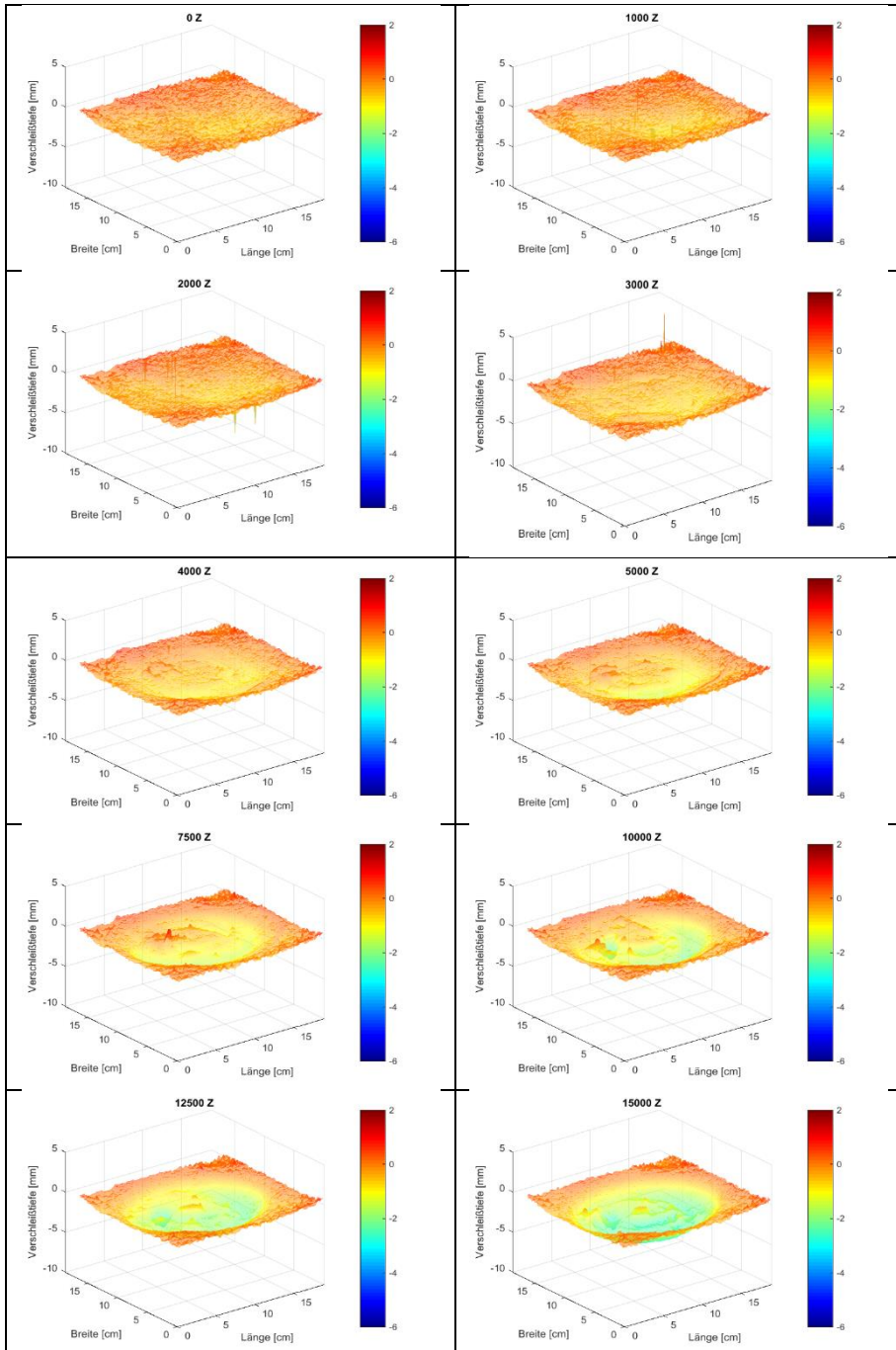


Abb. 8.62: P1\_unversiegelt: Volumenabtrag

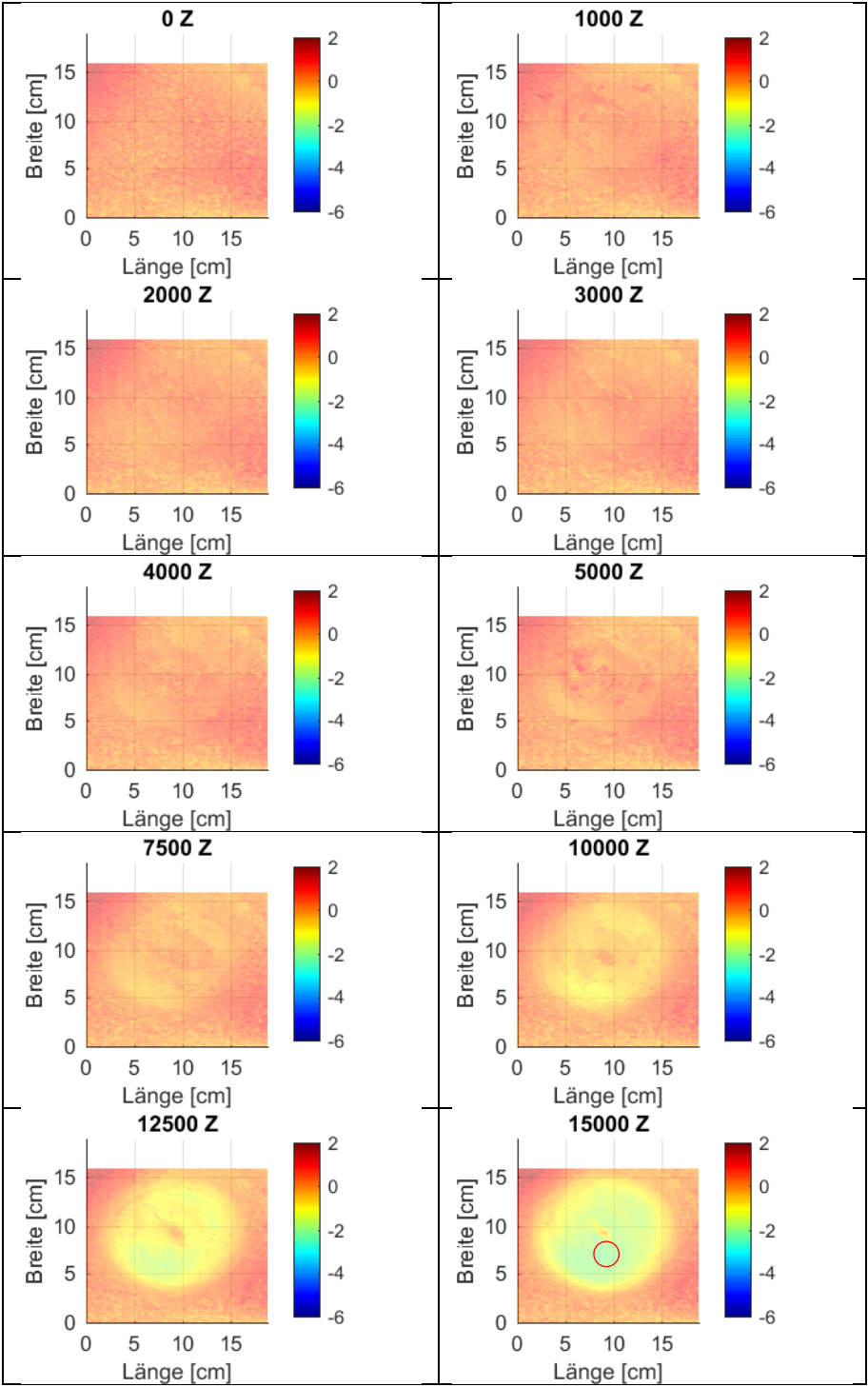
Tab. 8.54: P2\_versiegelt: Laserauswertung Draufsicht



Tab. 8.55: P2\_versiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht

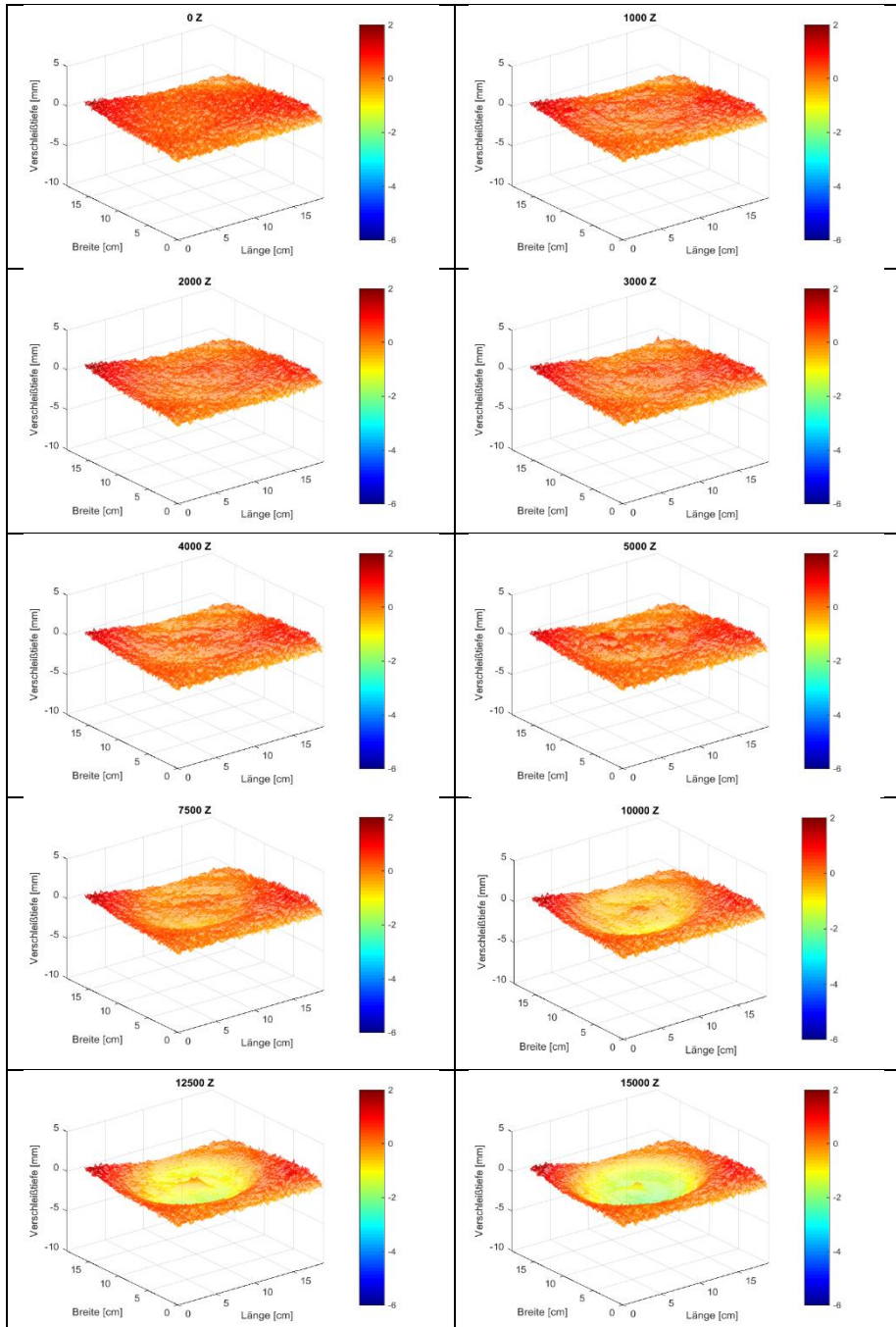


Tab. 8.56: P2\_unversiegelt: Laserauswertung Draufsicht





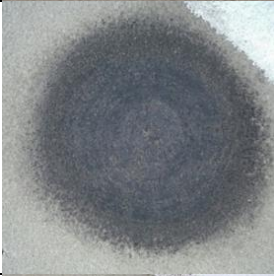
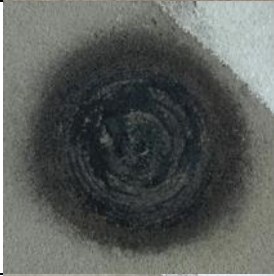

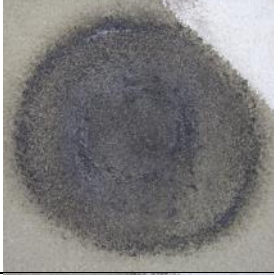
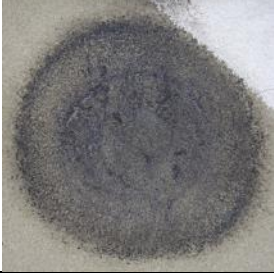
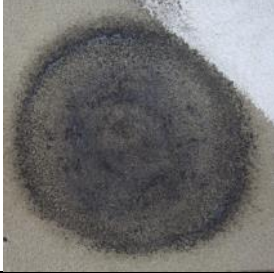






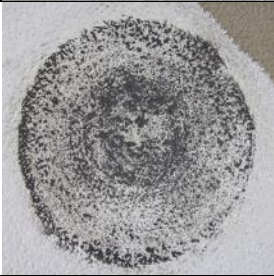
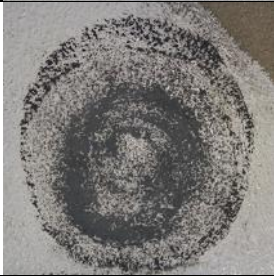
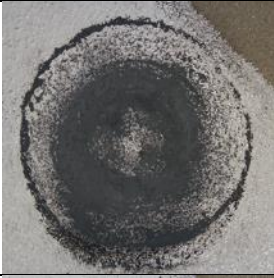
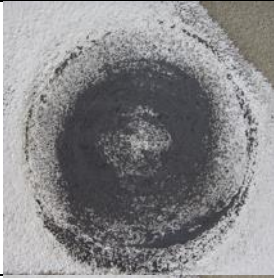
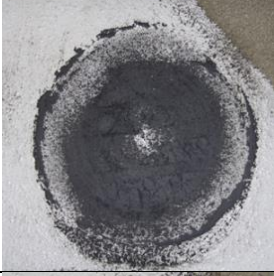
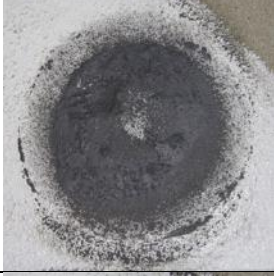
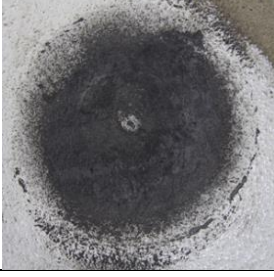
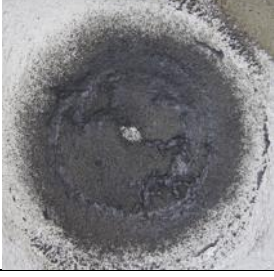
Tab. 8.57: P2\_unversiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.58: P2\_unversiegelt: Fotografische Auswertung

0 Z						1.000 Z
2.000 Z						3.000 Z
4.000 Z						5.000 Z
7.500 Z						10.000 Z
12.500 Z						15.000 Z

Tab. 8.59: P2\_versiegelt: Fotografische Auswertung

0 Z				1.000 Z
2.000 Z				3.000 Z
4.000 Z				5.000 Z
7.500 Z				10.000 Z
12.500 Z				15.000 Z

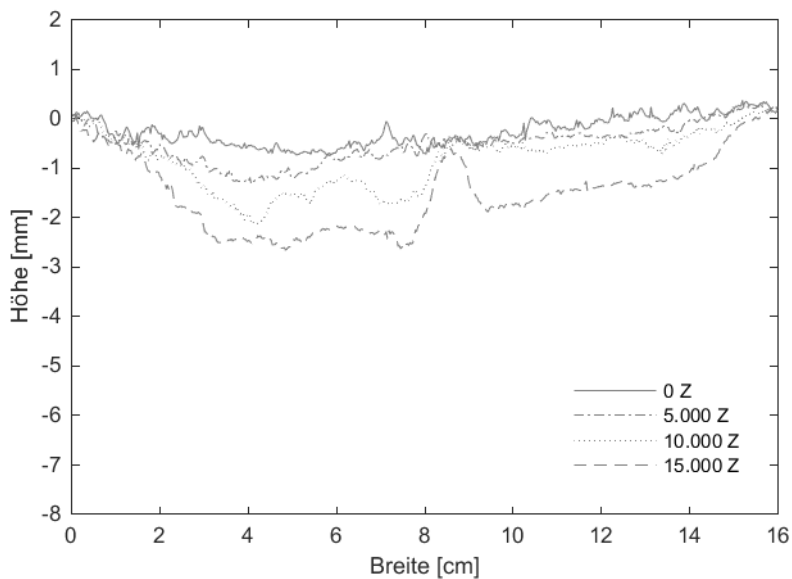


Abb. 8.63: P2\_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte

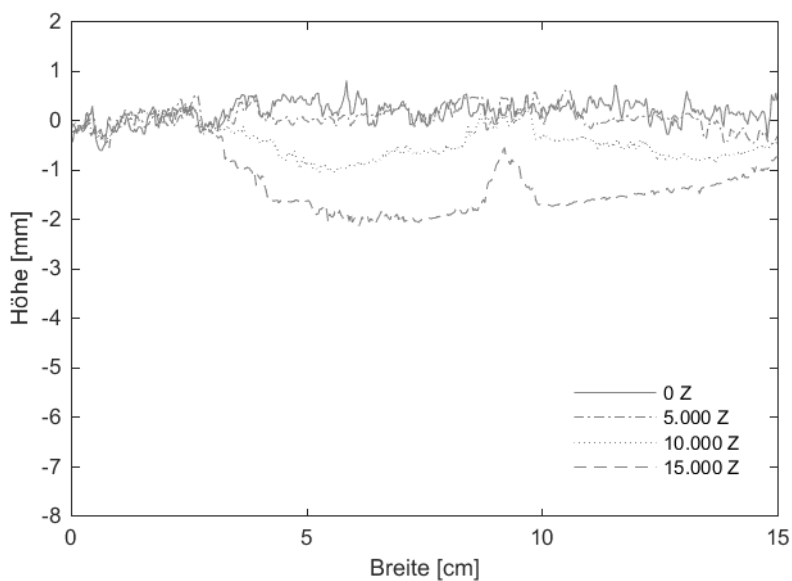


Abb. 8.64: P2\_unversiegelt: Querschnitt in Plattenmitte

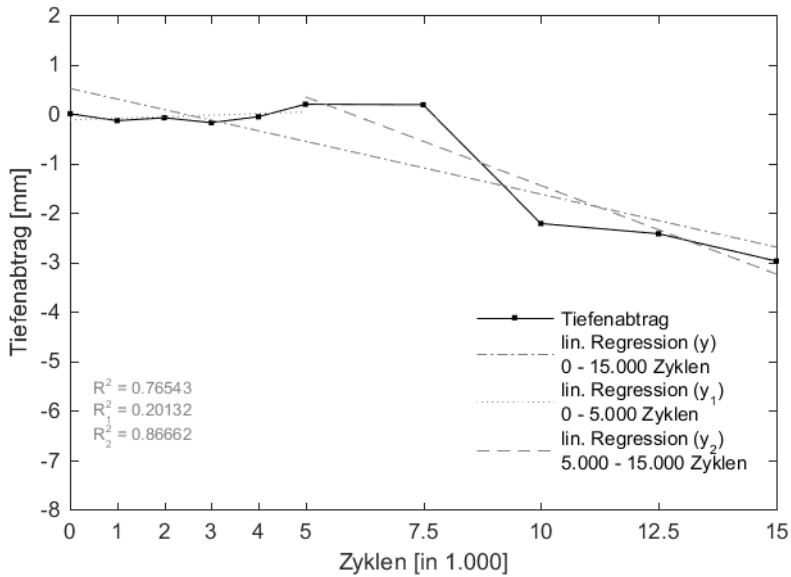


Abb. 8.65: P2\_versiegelt: Maximale Verschleißtiefe

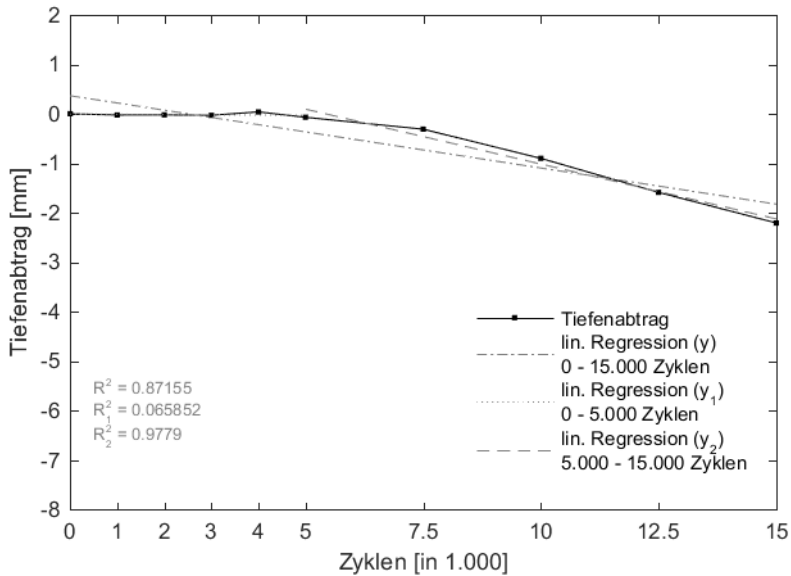


Abb. 8.66: P2\_unversiegelt: Maximale Verschleißtiefe

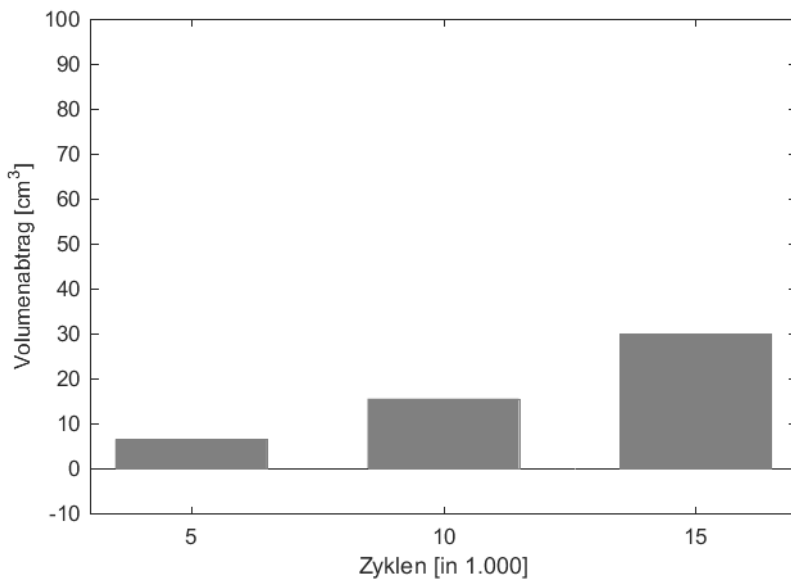


Abb. 8.67: P2\_versiegelt: Volumenabtrag

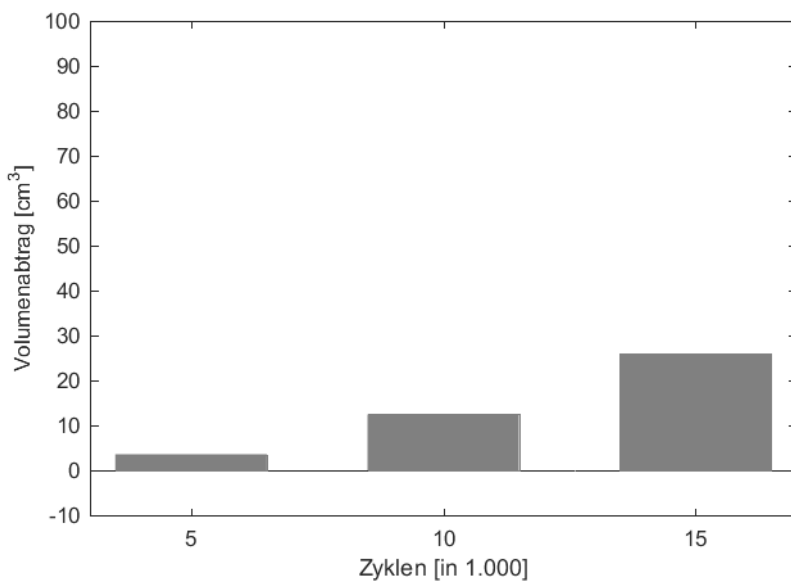
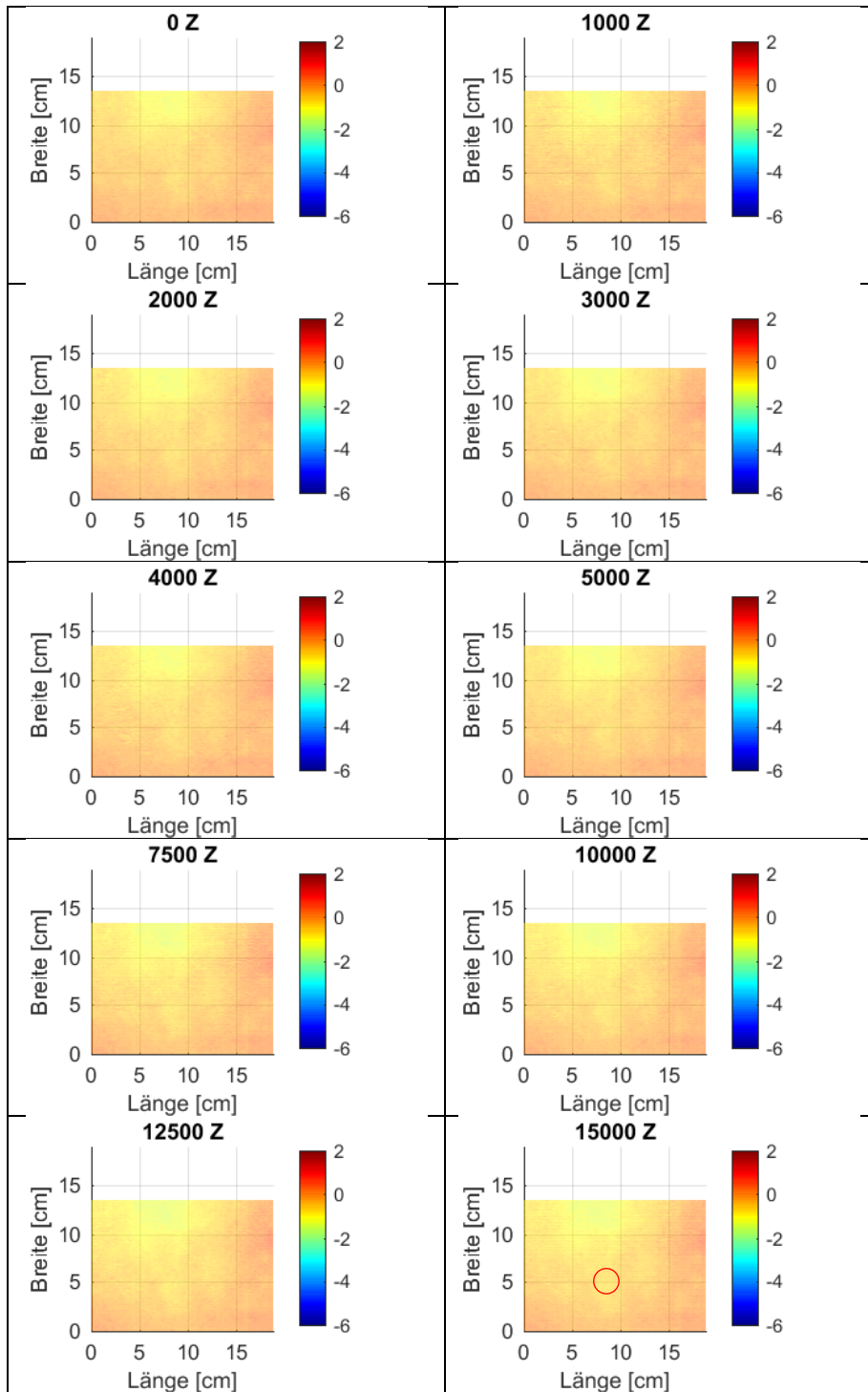
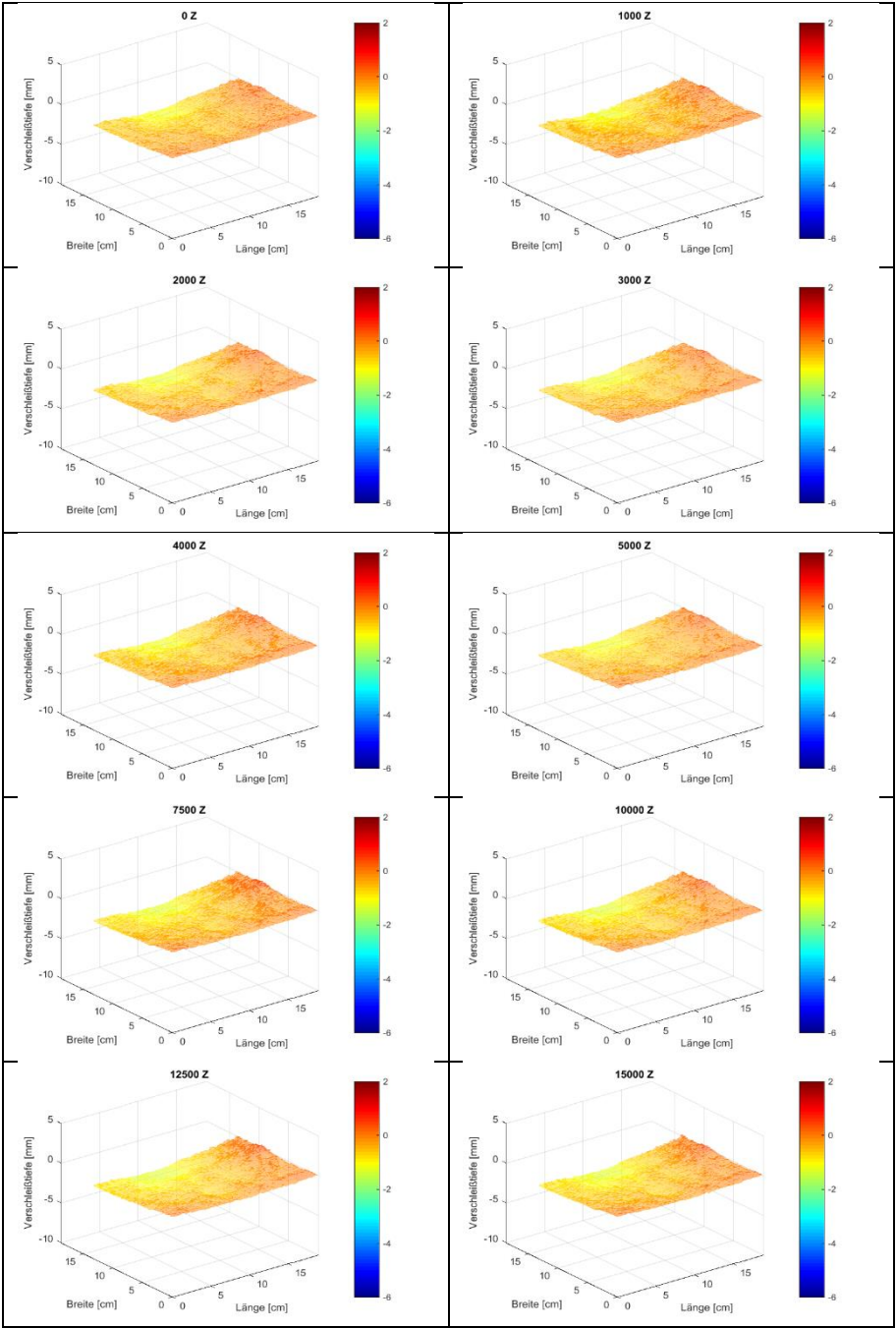


Abb. 8.68: P2\_unversiegelt: Volumenabtrag

Tab. 8.60: P3\_versiegelt: Laserauswertung Draufsicht

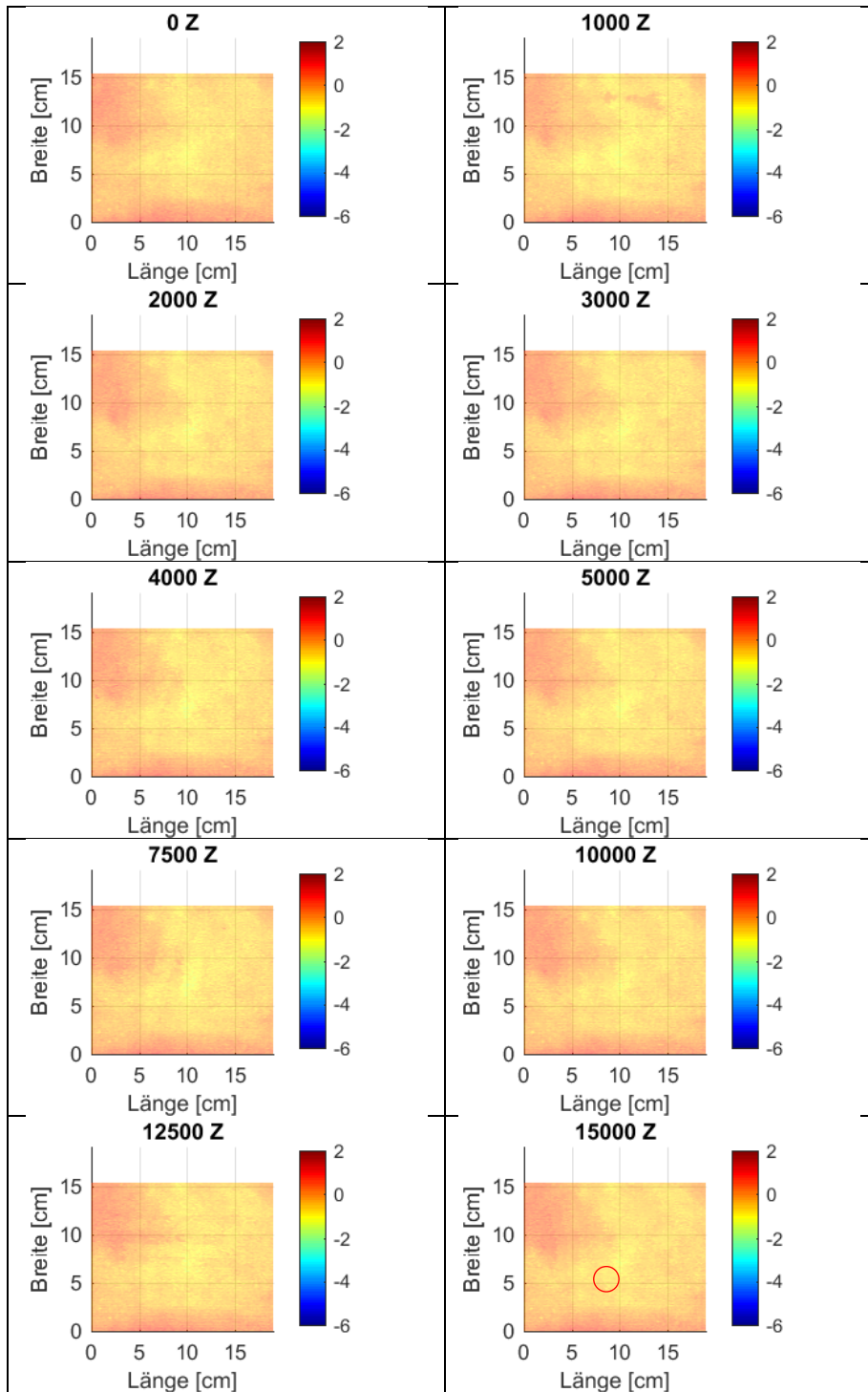


Tab. 8.61: P3\_versiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht

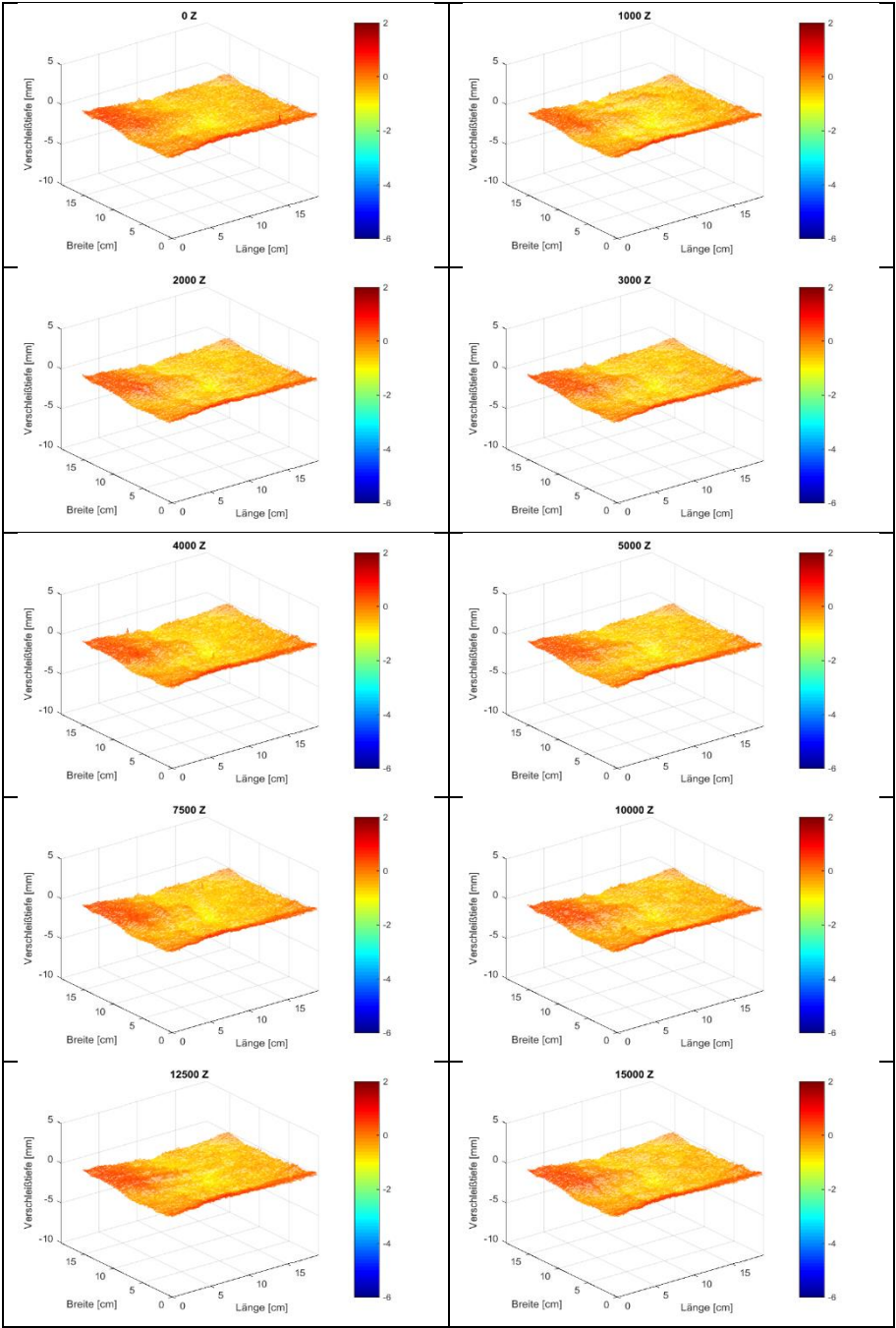




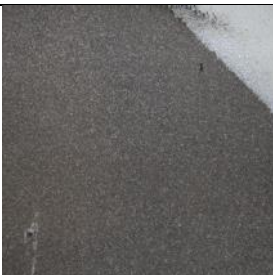
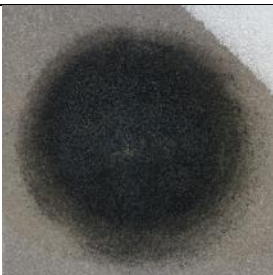
Tab. 8.62: P3\_unversiegelt: Laserauswertung Draufsicht



Tab. 8.63: P3\_unversiegelt: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.64: P3\_unversiegelt: Fotografische Auswertung

0 Z							15.000 Z
-----	--	---	--	--	---	--	----------

Tab. 8.65: P3\_versiegelt: Fotografische Auswertung

0 Z							15.000 Z
-----	--	---	--	--	---	--	----------

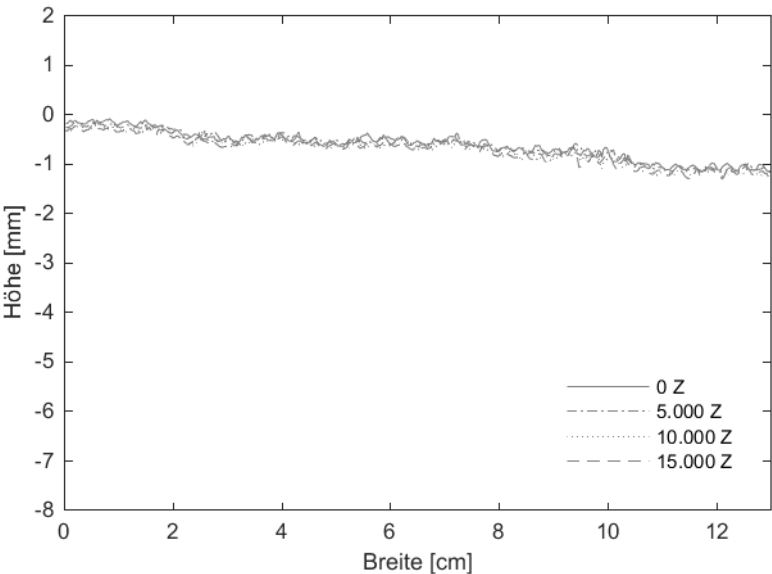


Abb. 8.69: P3\_versiegelt: Querschnitt in Plattenmitte

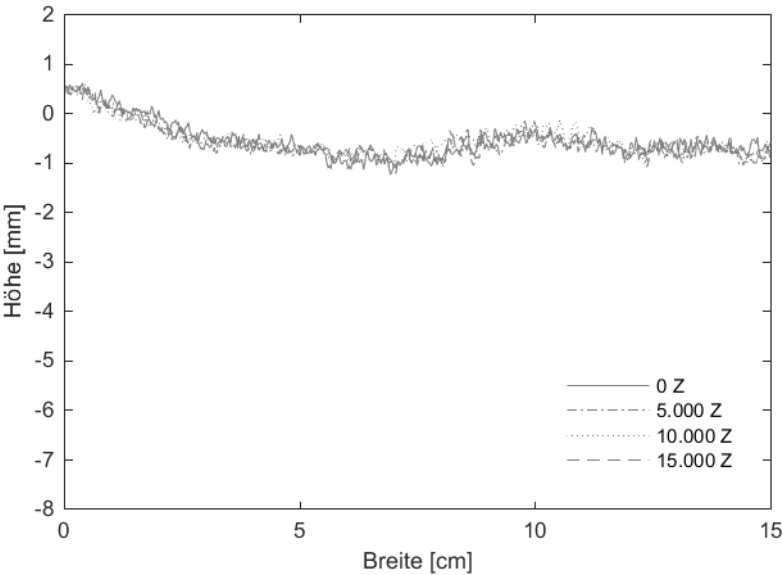


Abb. 8.70: P3\_unversiegelt: Querschnitt in Plattenmitte

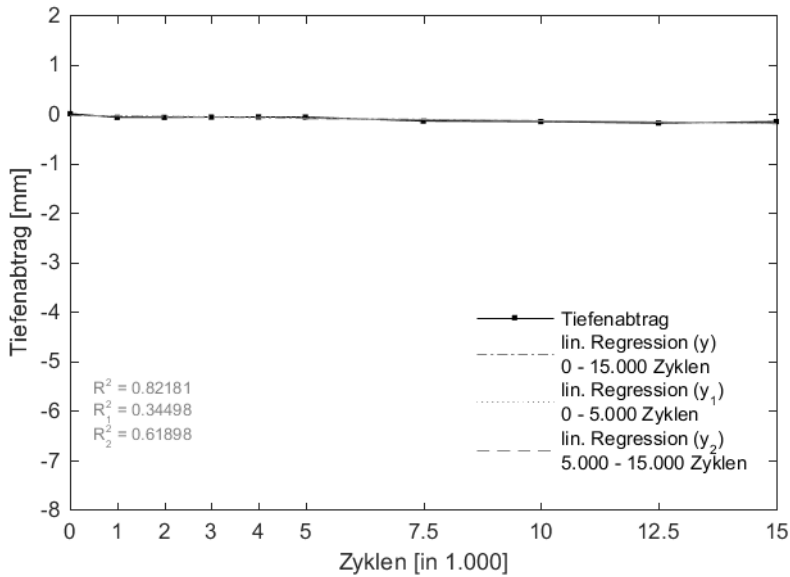


Abb. 8.71: P3\_versiegelt: Maximale Verschleißtiefe

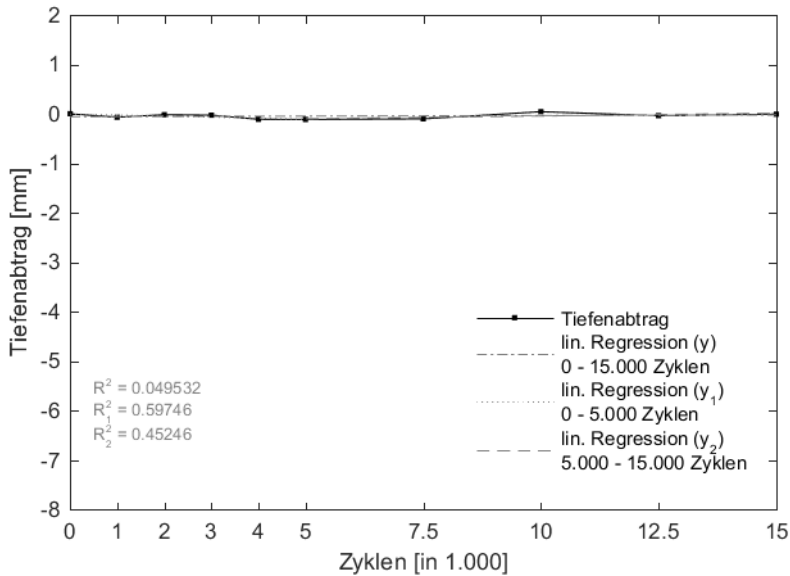


Abb. 8.72: P3\_unversiegelt: Maximale Verschleißtiefe

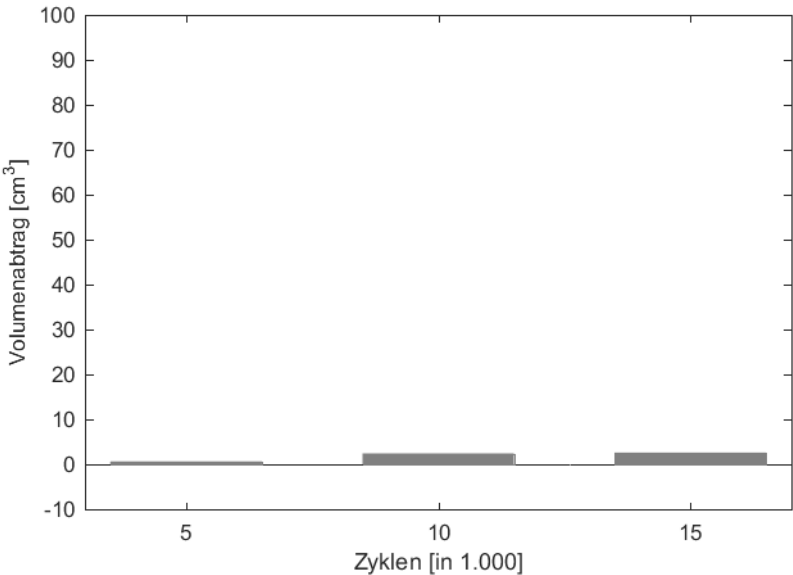


Abb. 8.73: P3\_versiegelt: Volumenabtrag

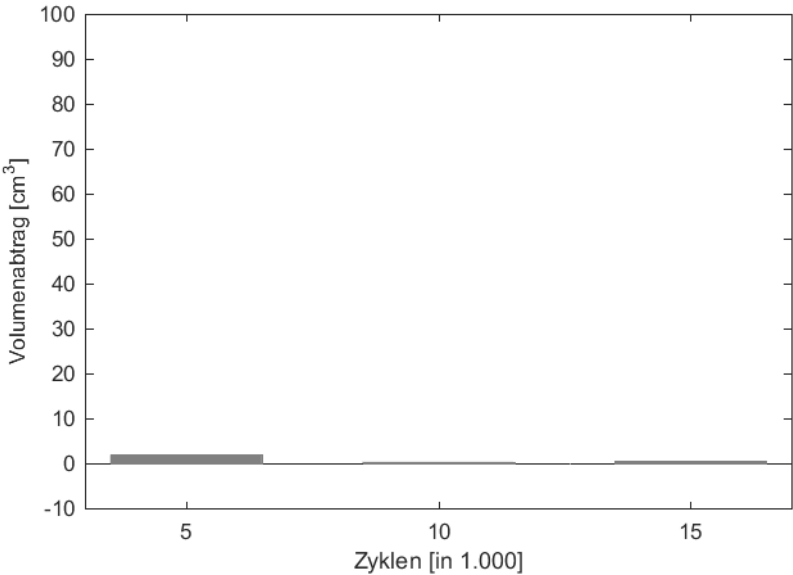


Abb. 8.74: P3\_unversiegelt: Volumenabtrag

## Anhang F

Tab. 8.66: Ergebnisse Zugmodule in N/mm<sup>2</sup> der Einzelkomponenten

	normalgelagert			wassergesättigt			nachvernetzt		
	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]								
Nr.	0,1	1	10	0,1	1	10	0,1	1	10
A	2.175	2.480	3.552	1.368	2.789	2.935	1.896	1.990	3.000
B	2.446	2.269	2.545	560	1.127	829	904	920	1.079
C	853	475	1.795	431	589	430	471	362	624
D	1.400	2.009	-	440	439	664	1.118	1.823	2.763
E	-	4	5	-	3	3	-	4	3
F	72	122	104	80	94	76	150	101	145
G	788	462	1307	2113	168	312	200	761	895
H	168	200	1.034	14	20	39	1.716	683	1.489
K	553	1.027	2.988	383	0	258	1.357	1.241	2.659
L	1.224	1.810	2.474	67	190	453	719	956	2.220
M	677	1.801	887	70	206	342	811	1.391	1.261
N	-	8	9	-	6	6	-	9	9
- Nicht geprüft									

Tab. 8.67: Ergebnisse Zugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup> der Einzelkomponenten

	Normalgelagert			wassergesättigt			nachvernetzt		
	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]								
Nr.	0,1	1	10	0,1	1	10	0,1	1	10
A	9,7	9,8	14,4	6,0	7,8	7,8	8,2	9,9	7,8
B	29,6	35,7	48,2	10,1	22,0	28,6	15,6	25,6	34,0
C	6,8	9,8	14,5	-	4,7	5,2	7,8	11,1	15,2
D	7,2	7,7	-	2,9	3,3	6,7	6,4	9,0	12,0
E	-	-	3,1	-	-	1,0	-	-	2,9
F	1,6	1,8	1,9	1,7	1,7	1,8	2,0	2,5	2,4
G	13,4	12,3	15,8	-	9,7	10,6	-	16,1	12,8
H	-	12,6	11,9	-	-	11,6	-	11,2	11,7
K	6,3	10,1	13,8	5,2	-	3,0	6,5	9,0	10,5
L	5,8	10,1	11,1	1,0	1,7	2,3	6,7	7,3	13,3
M	9,4	12,4	19,8	-	5,1	7,5	5,6	12,1	15,3
N	-	-	3,4	-	-	-	-	-	1,9
- Nicht geprüft									

Tab. 8.68: Ergebnisse Zugmodul in N/mm<sup>2</sup> im System

	Normalgelagert			Wassergesättigt		
	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]					
Nr.	0,1	1	10	0,1	1	10
O	239	1.261	-	156	407	431
P	250	654	641	133	174	116
Q	1.046	475	887	334	398	513
R	228	243	350	63	144	139
S	967	1.738	454	152	391	357
T	5.605	8.620	4.313	1.169	1.225	1.913
U	772	515	462	180	125	216
- Nicht geprüft						

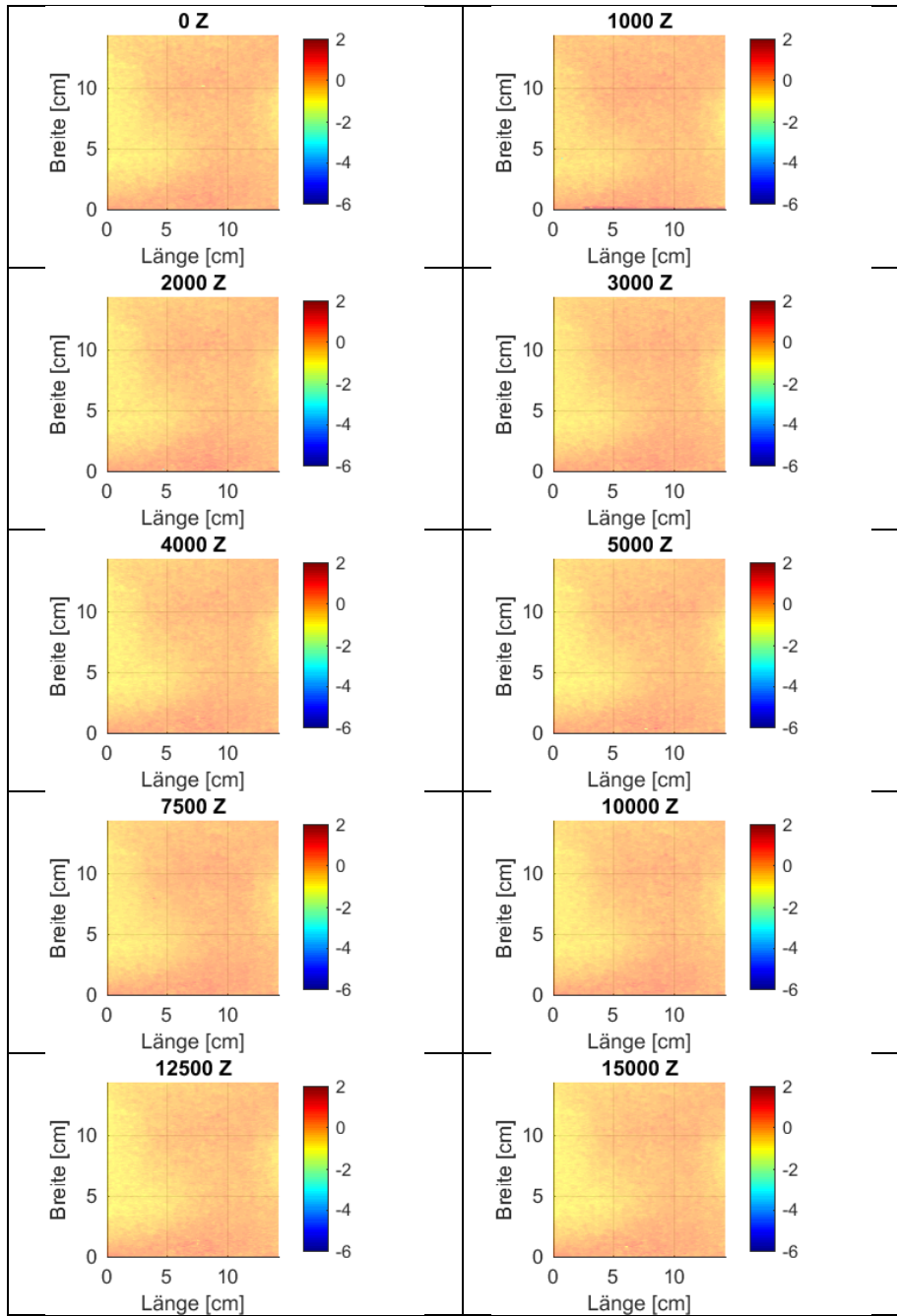
Tab. 8.69: Ergebnisse Zugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup> im System

	Normalgelagert			Wassergesättigt		
	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]					
Nr.	0,1	1	10	0,1	1	10
O	2,8	3,7	-	1,2	1,9	2,0
P	2,5	3,9	5,3	8,9	1,5	1,3
Q	2,9	3,4	3,1	0,9	2,2	2,0
R	1,8	2,2	2,8	0,2	1,3	1,4
S	3,8	4,8	6,8	0,7	2,1	2,7
T	11,2	13,4	15,3	3,9	9,4	9,7
U	4,1	6,3	7,1	0,3	1,6	1,8
- Nicht geprüft						

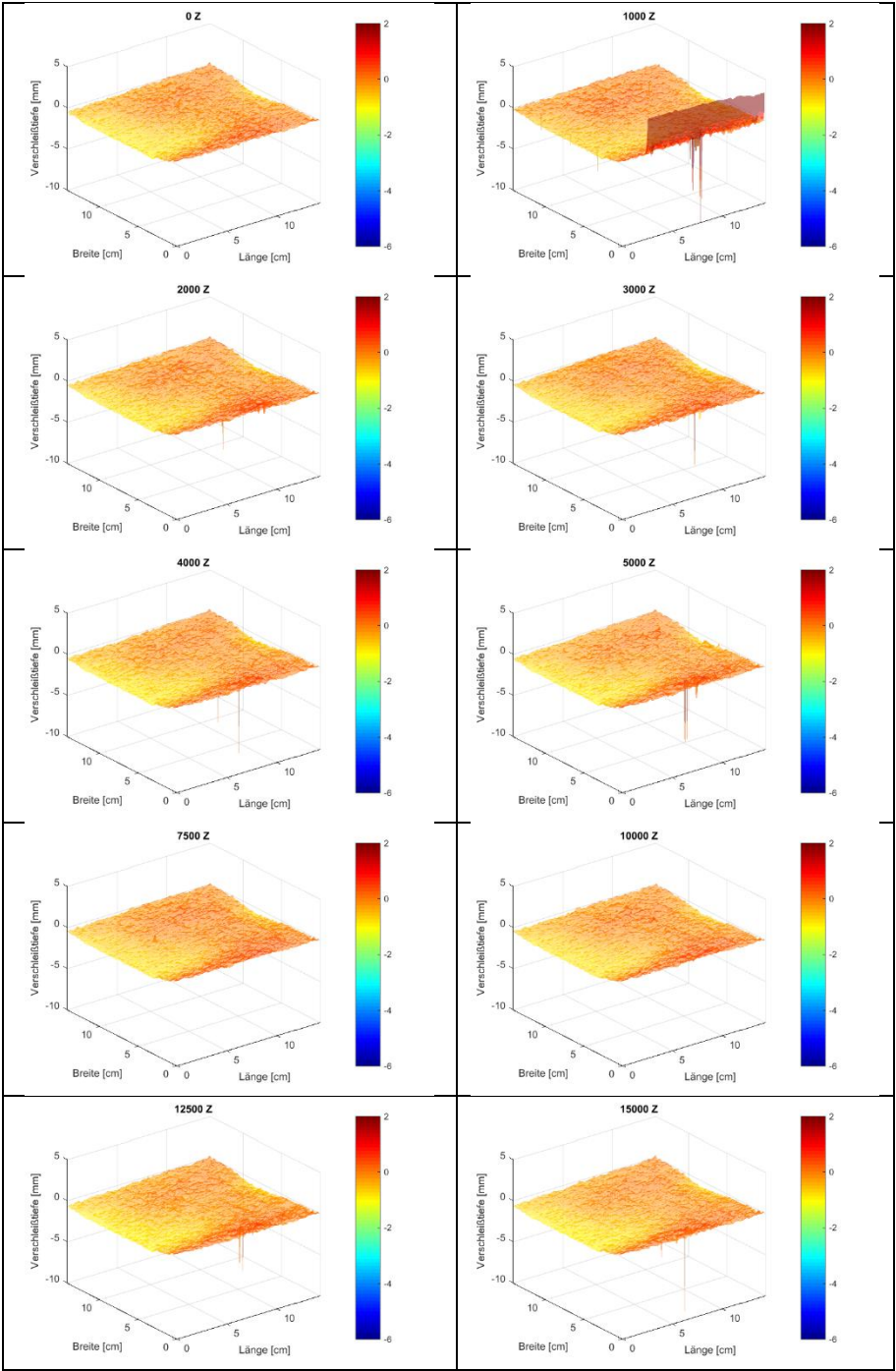


## Anhang G

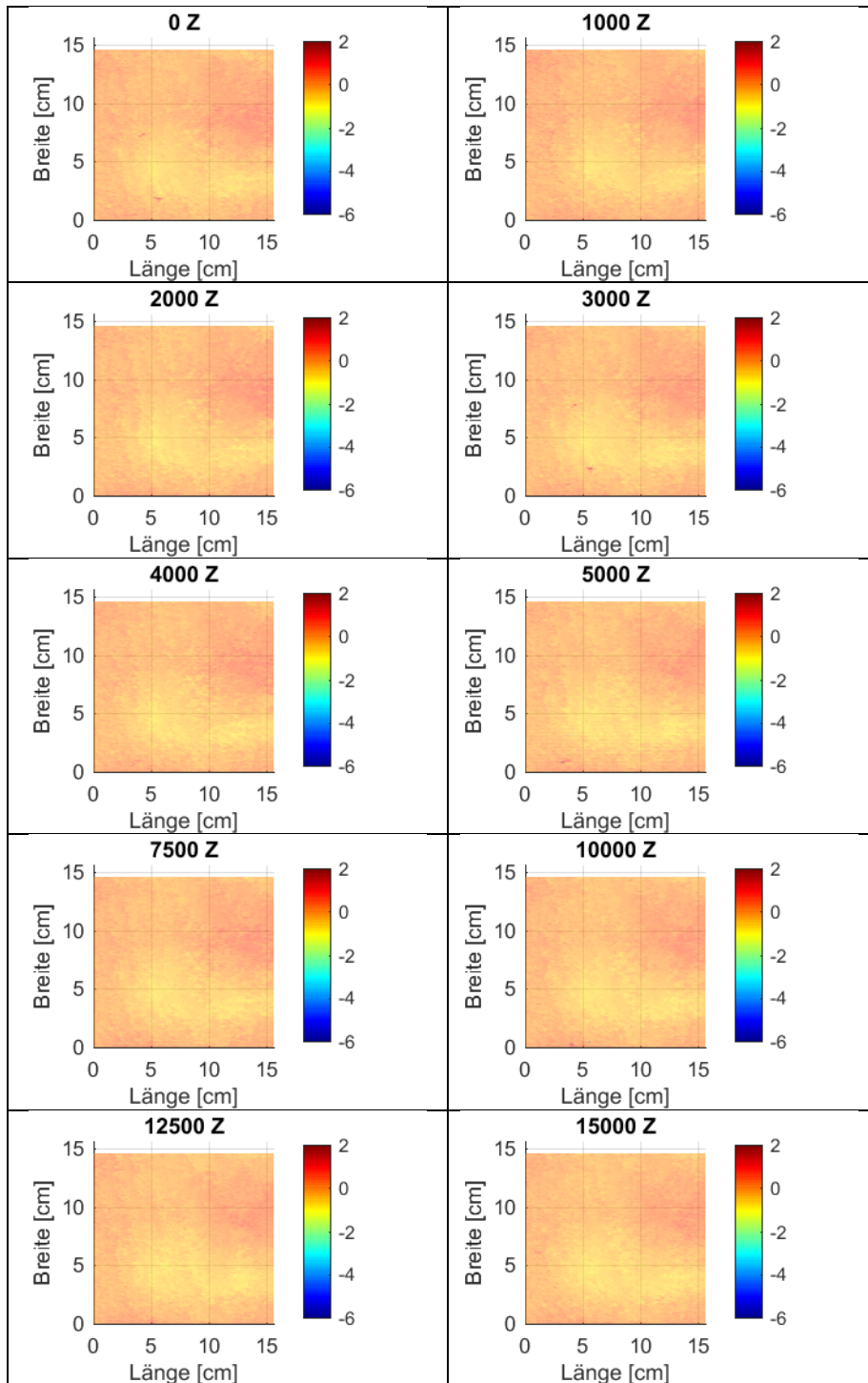
Tab. 8.70: P1\_nass: Laserauswertung Draufsicht



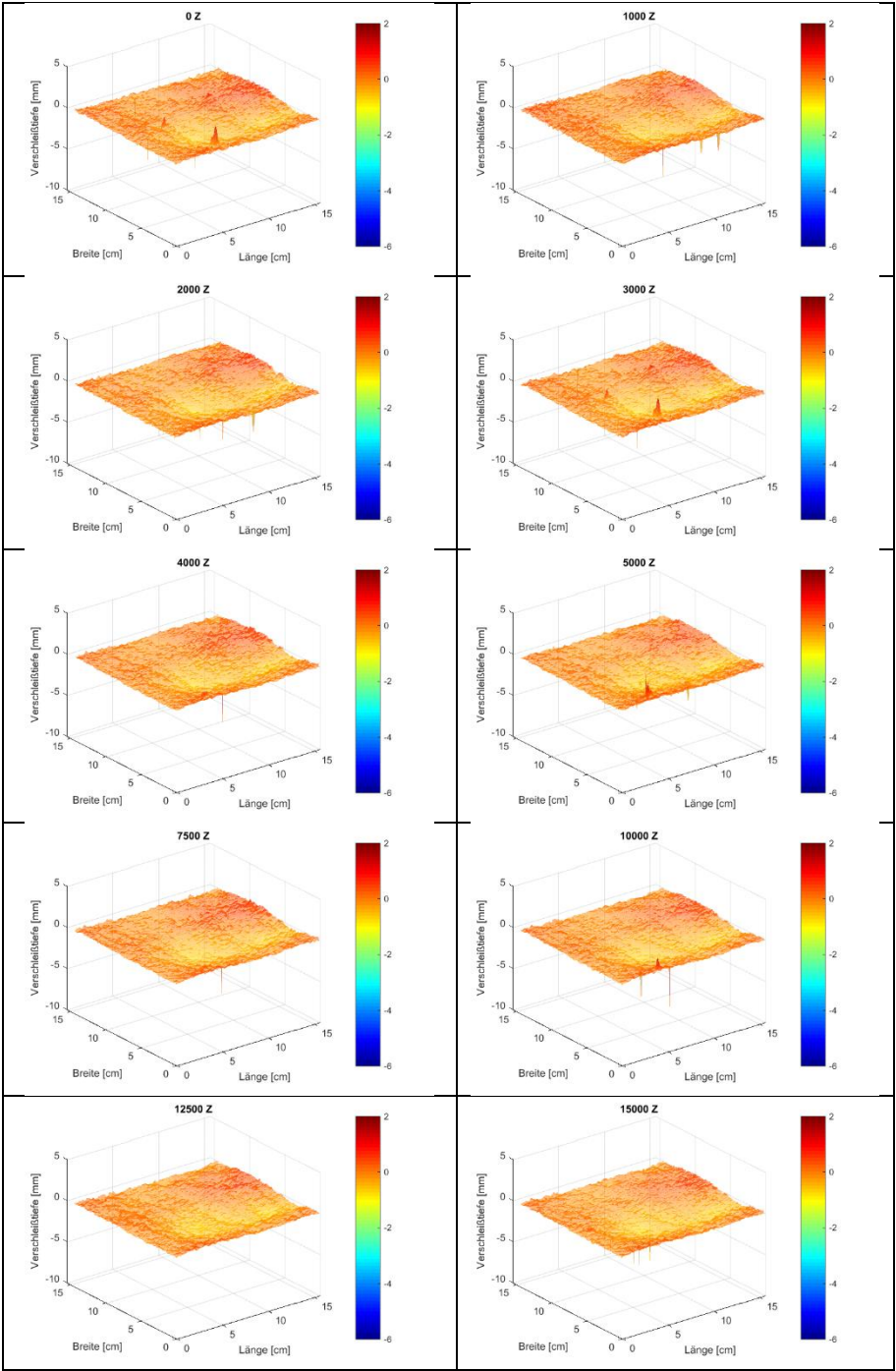
Tab. 8.71: P1\_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht








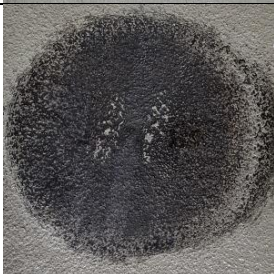



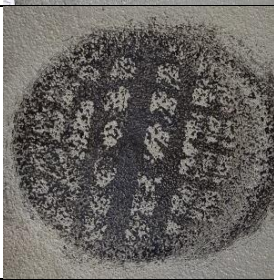
Tab. 8.72: P1\_trocken: Laserauswertung Draufsicht



Tab. 8.73: P1\_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht



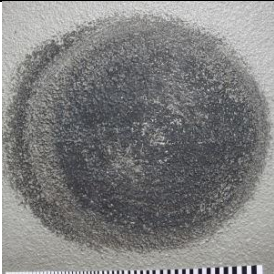
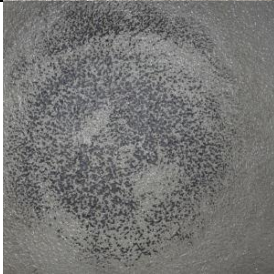








Tab. 8.74: P1\_nass: Fotografische Auswertung

0 Z						1.000 Z
2.000 Z						3.000 Z
4.000 Z						5.000 Z
7.500 Z						10.000 Z
12.500 Z						15.000 Z



Tab. 8.75: P1\_trocken: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z
7.500 Z					10.000 Z
12.500 Z					15.000 Z

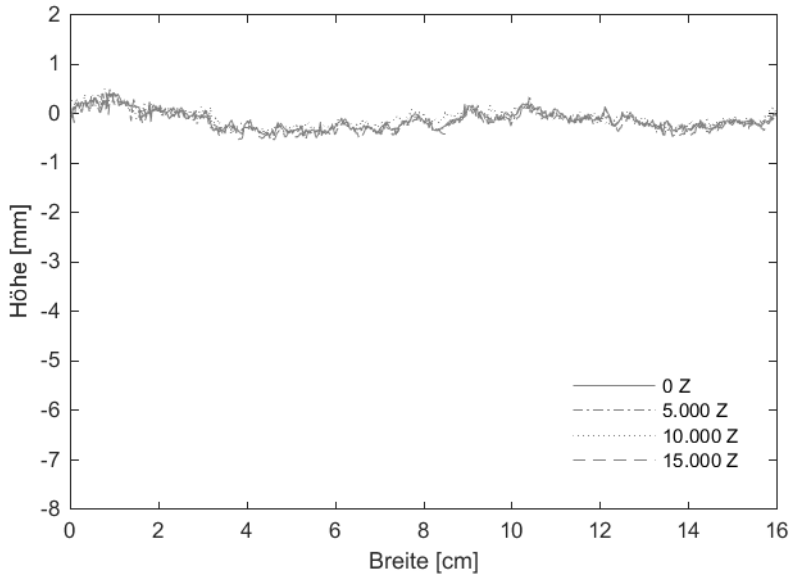


Abb. 8.75: P1\_nass: Querschnitt in Plattenmitte

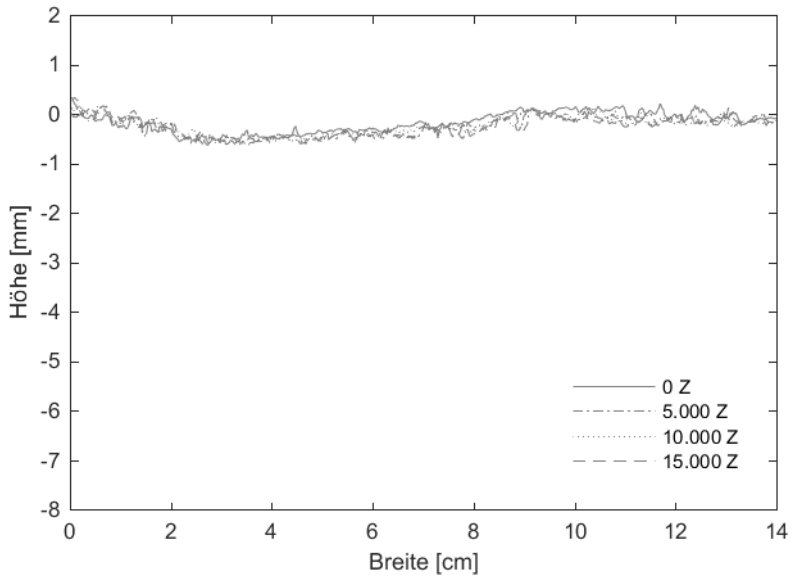


Abb. 8.76: P1\_trocken: Querschnitt in Plattenmitte

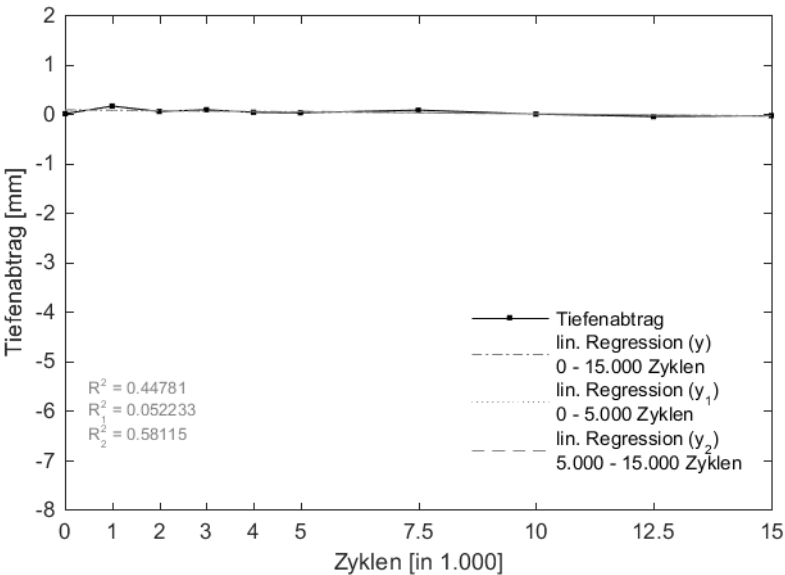


Abb. 8.77: P1<sub>nass</sub>: Maximale Verschleißtiefe

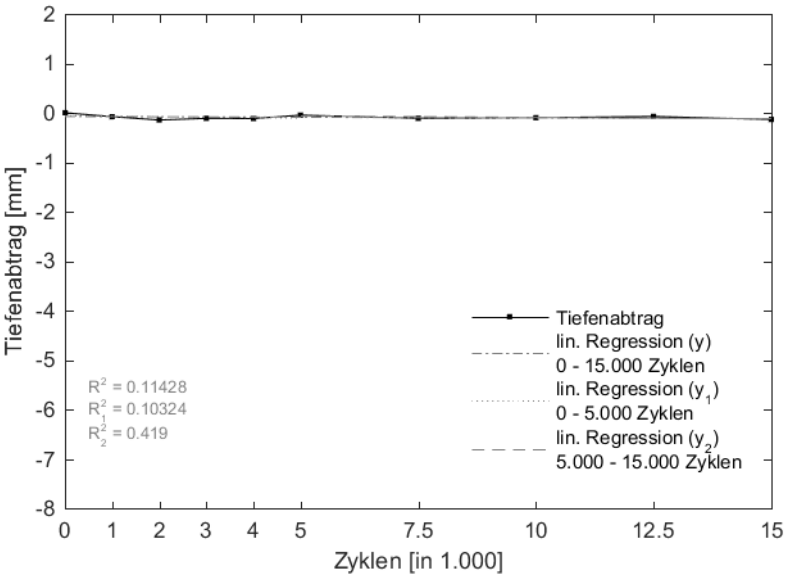


Abb. 8.78: P1<sub>trocken</sub>: Maximale Verschleißtiefe



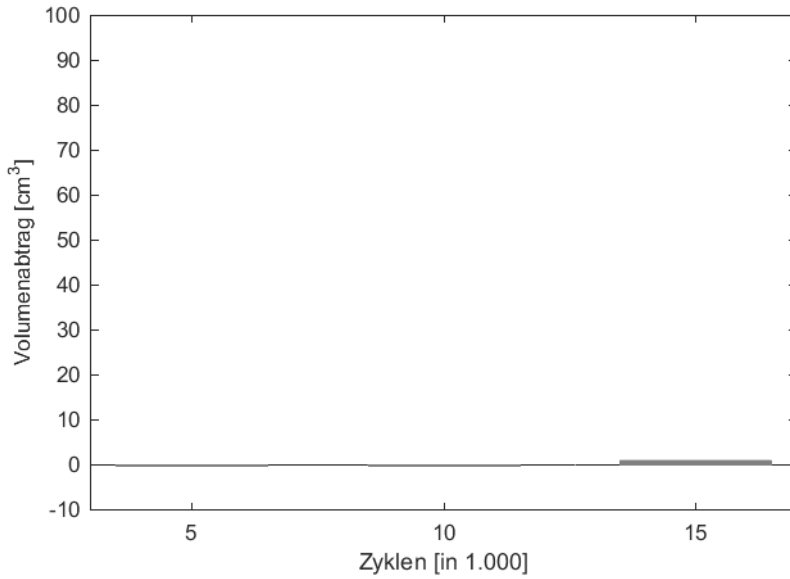


Abb. 8.79: P1\_nass: Volumenabtrag

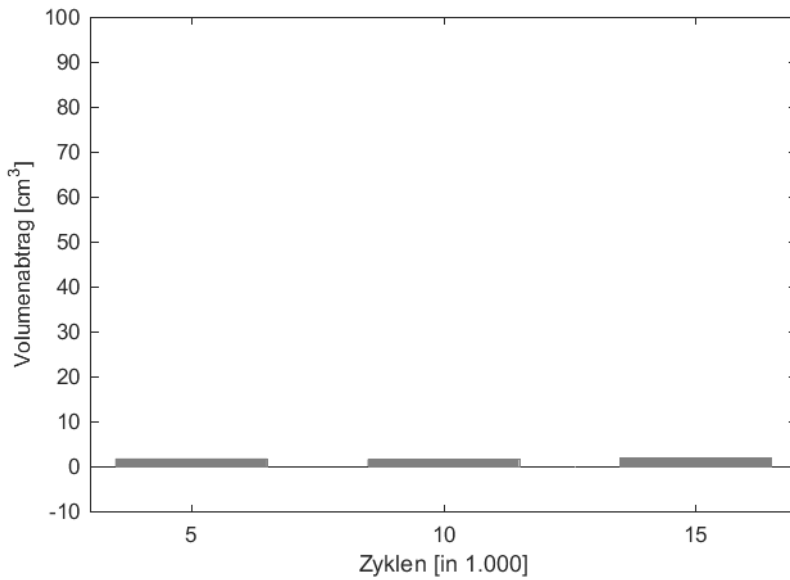
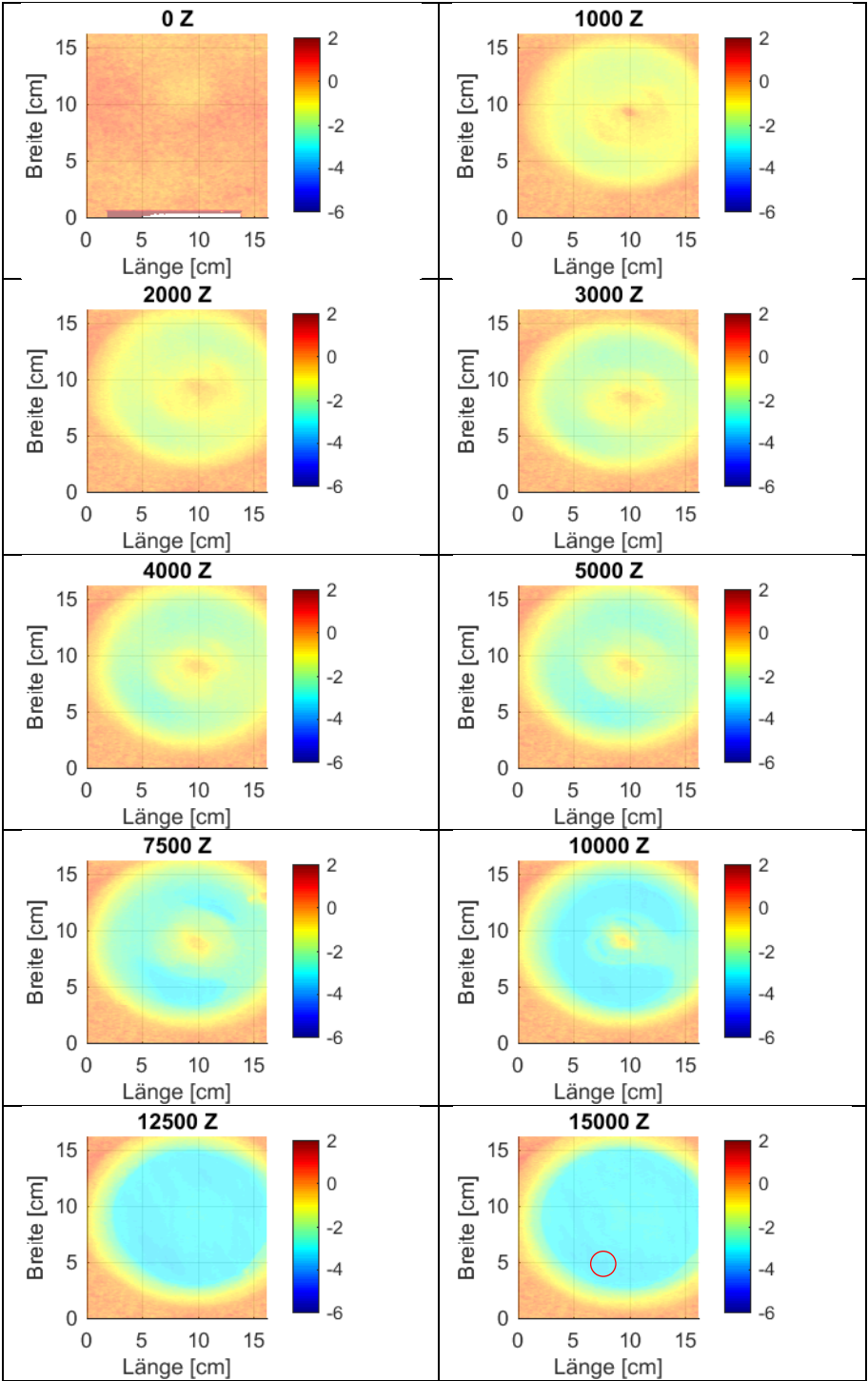
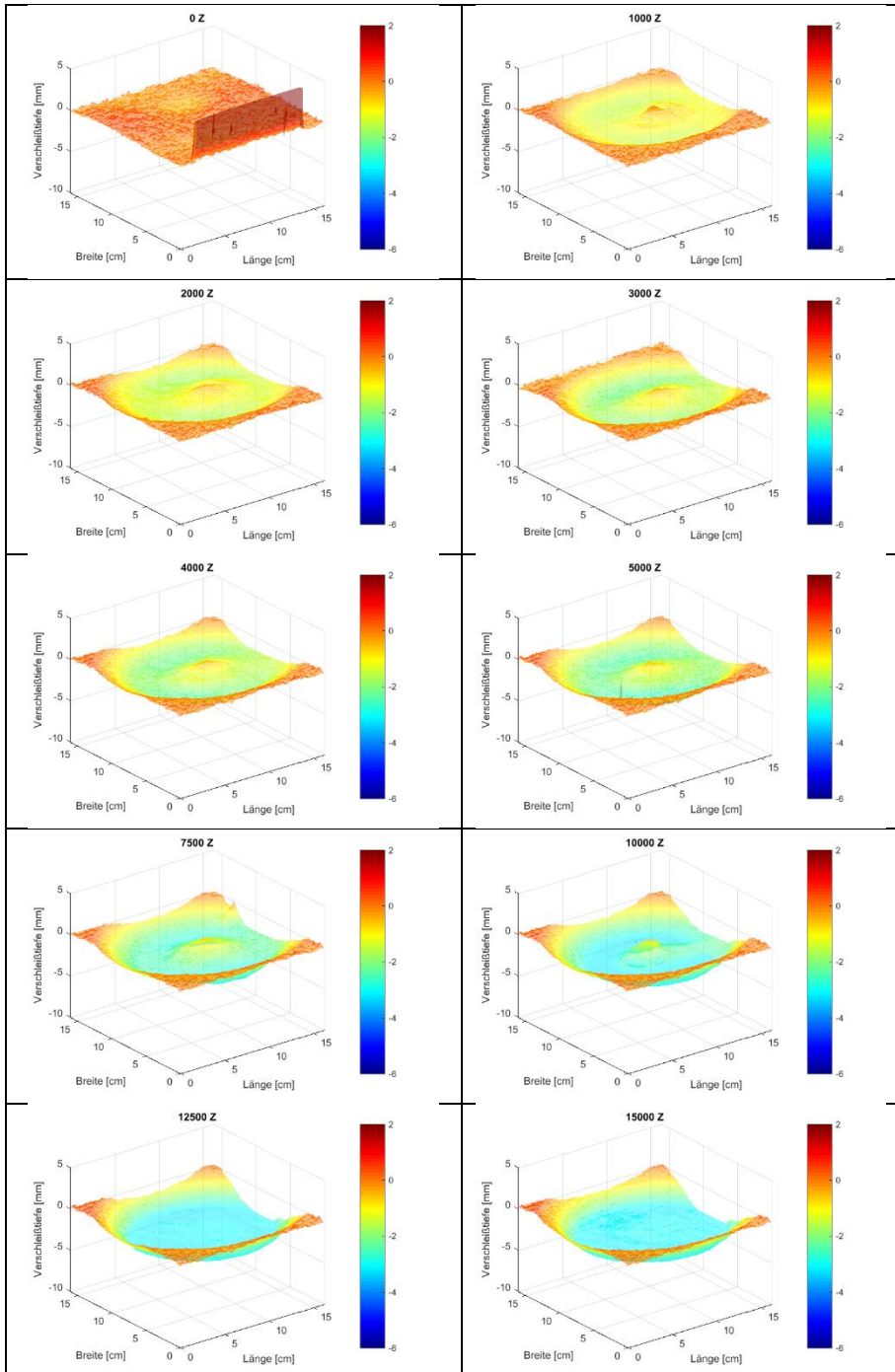


Abb. 8.80: P1\_trocken: Volumenabtrag

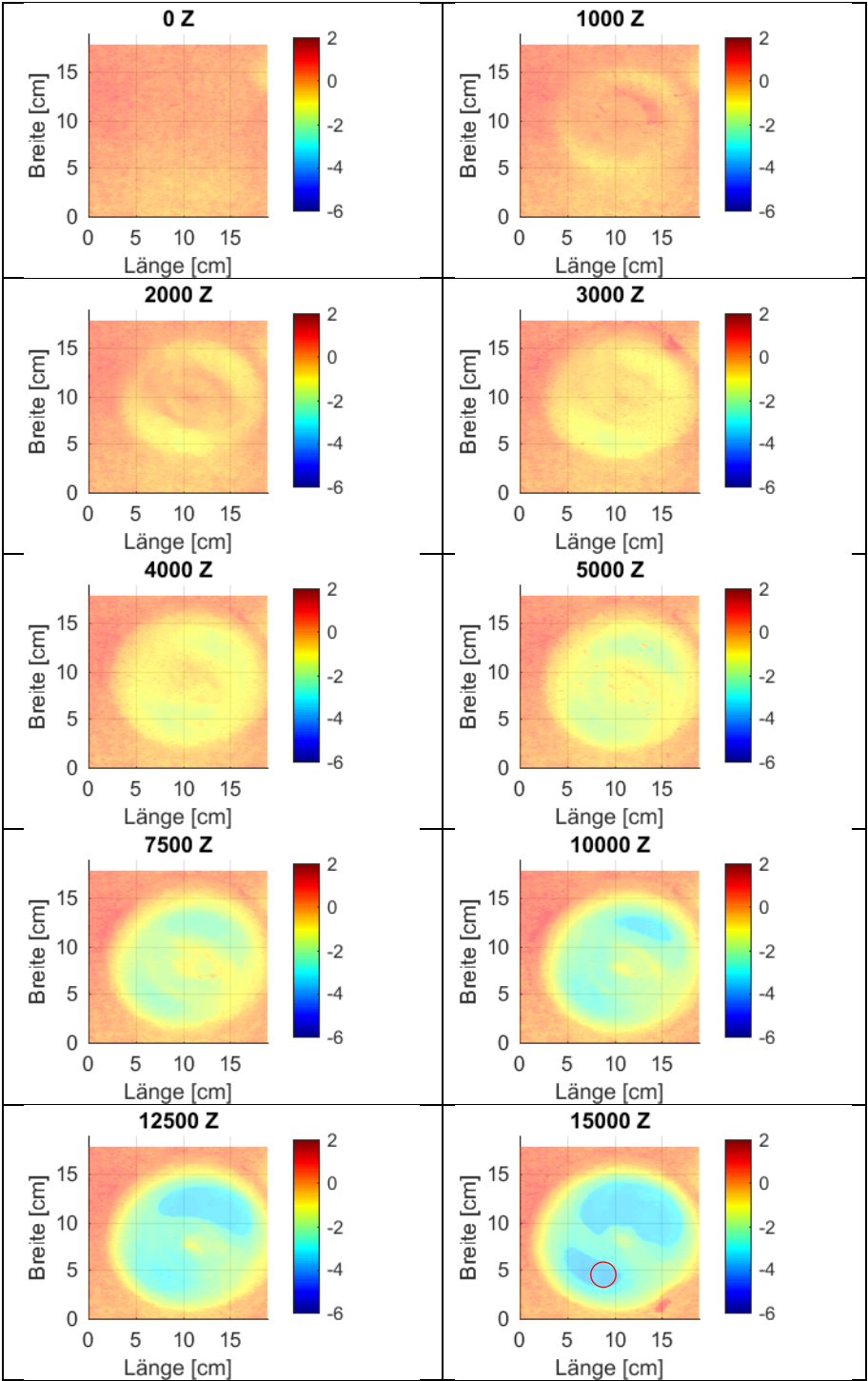
Tab. 8.76: P2\_nass: Laserauswertung Draufsicht



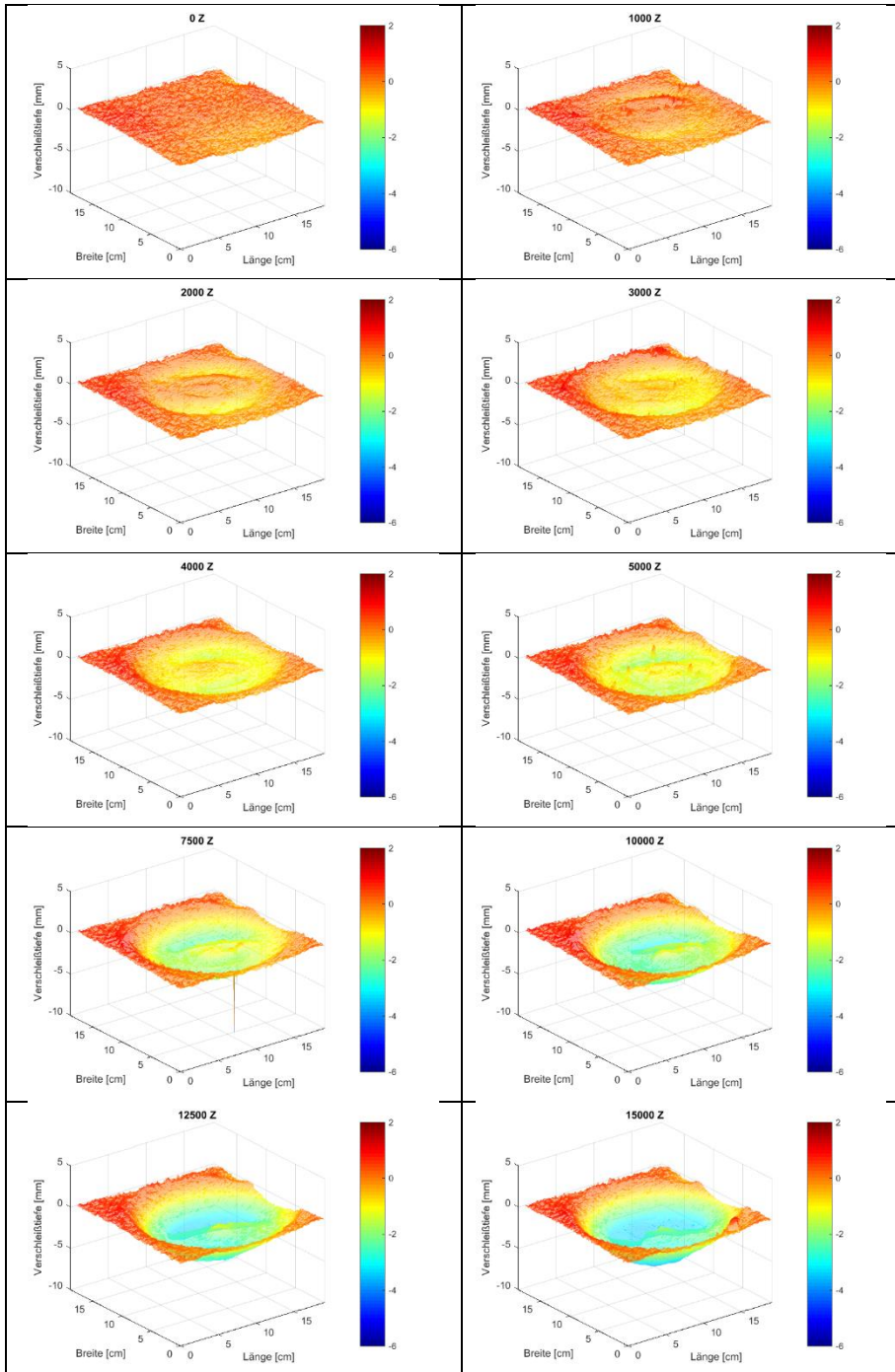
Tab. 8.77: P2\_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.78: P2\_trocken: Laserauswertung Draufsicht






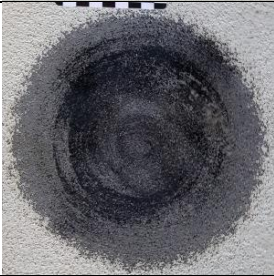






Tab. 8.79: P2\_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht


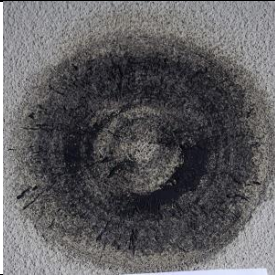


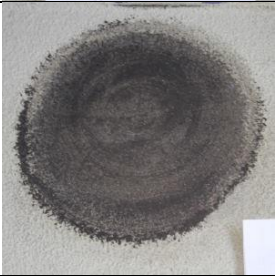

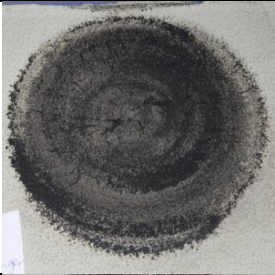







Tab. 8.80: P2\_nass: Fotografische Auswertung

0 Z						1.000 Z
2.000 Z						3.000 Z
4.000 Z						5.000 Z
7.500 Z						10.000 Z
12.500 Z						15.000 Z

Tab. 8.81: P2\_trocken: Fotografische Auswertung

0 Z				1.000 Z
2.000 Z				3.000 Z
4.000 Z				5.000 Z
7.500 Z				10.000 Z
12.500 Z				15.000 Z

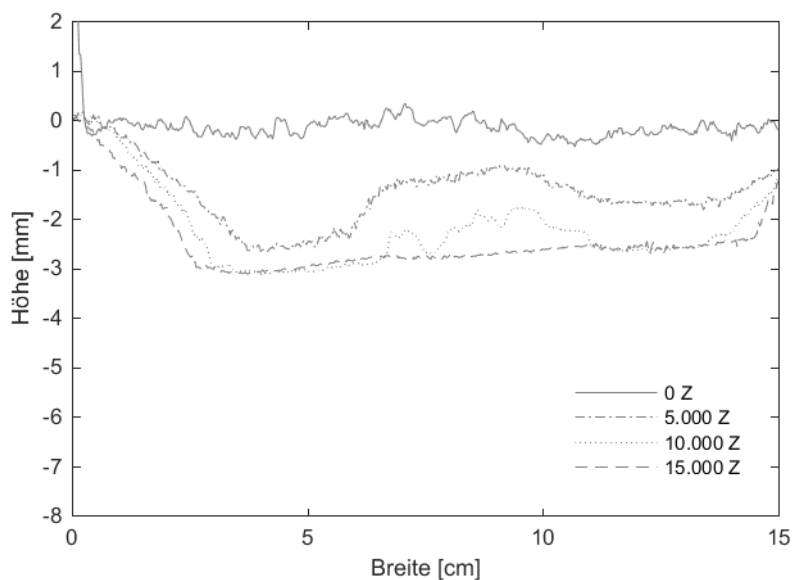


Abb. 8.81: P2\_nass: Querschnitt in Plattenmitte

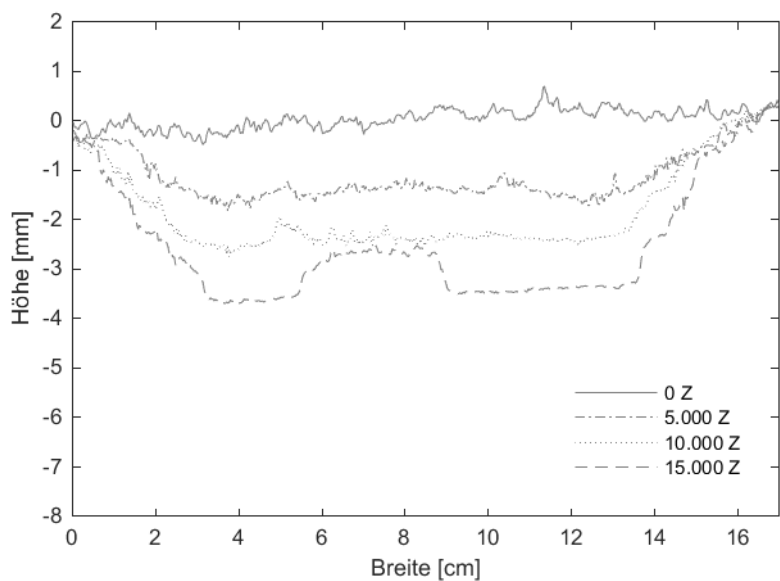


Abb. 8.82: P2\_trocken: Querschnitt in Plattenmitte



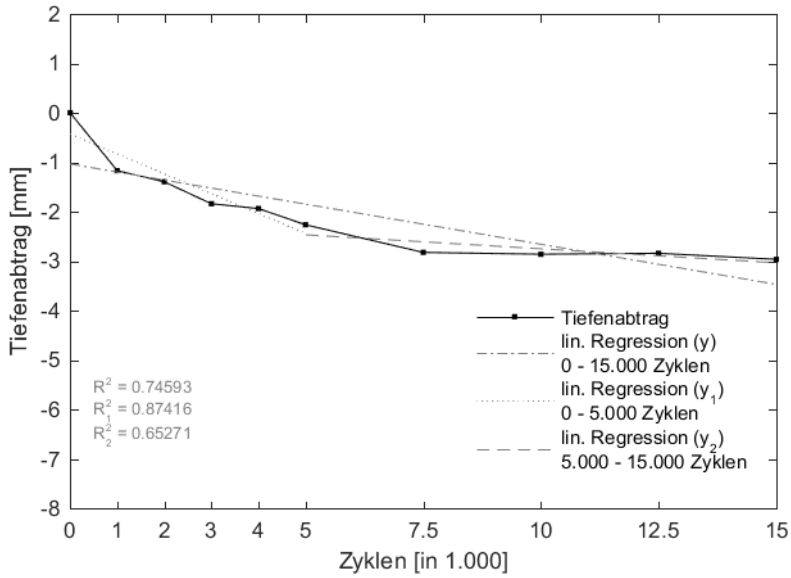


Abb. 8.83: P2\_nass: Maximale Verschleißtiefe

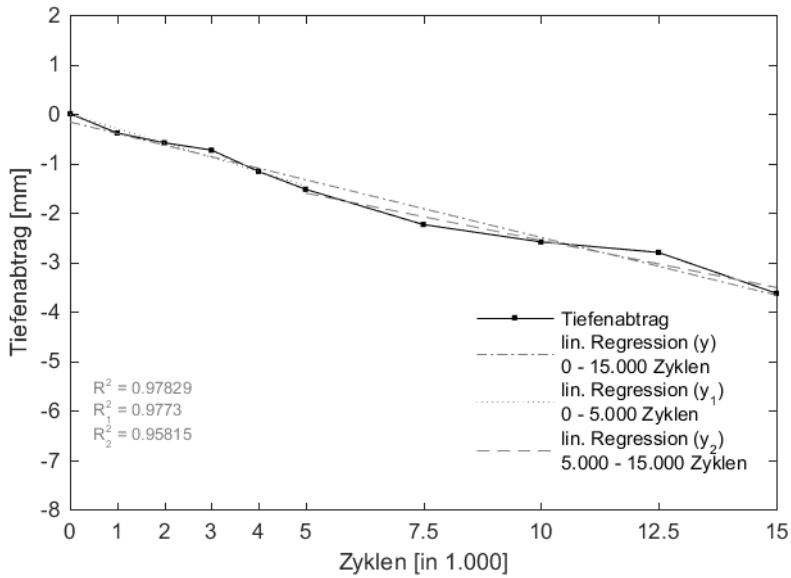


Abb. 8.84: P2\_trocken: Maximale Verschleißtiefe

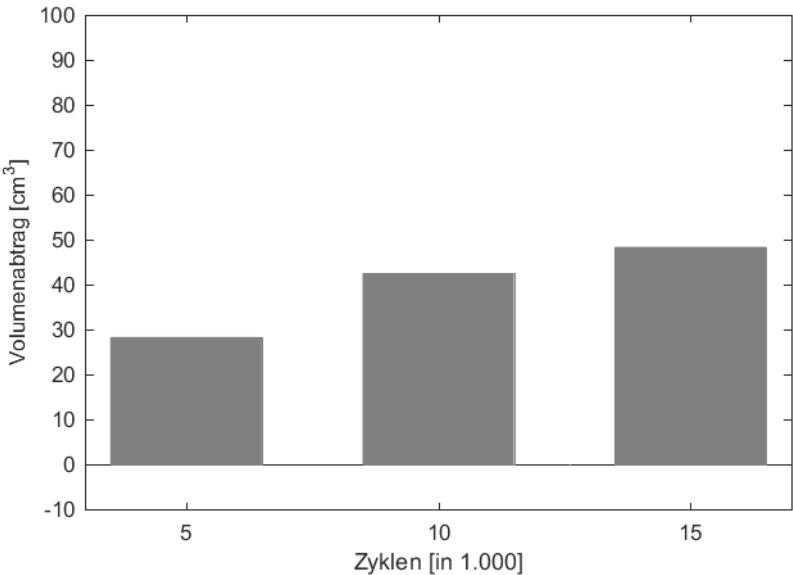


Abb. 8.85: P2\_nass: Volumenabtrag

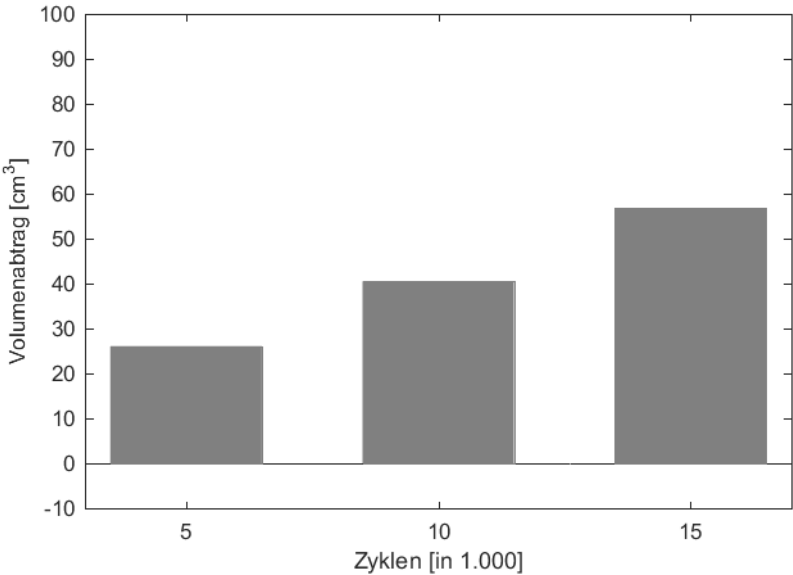
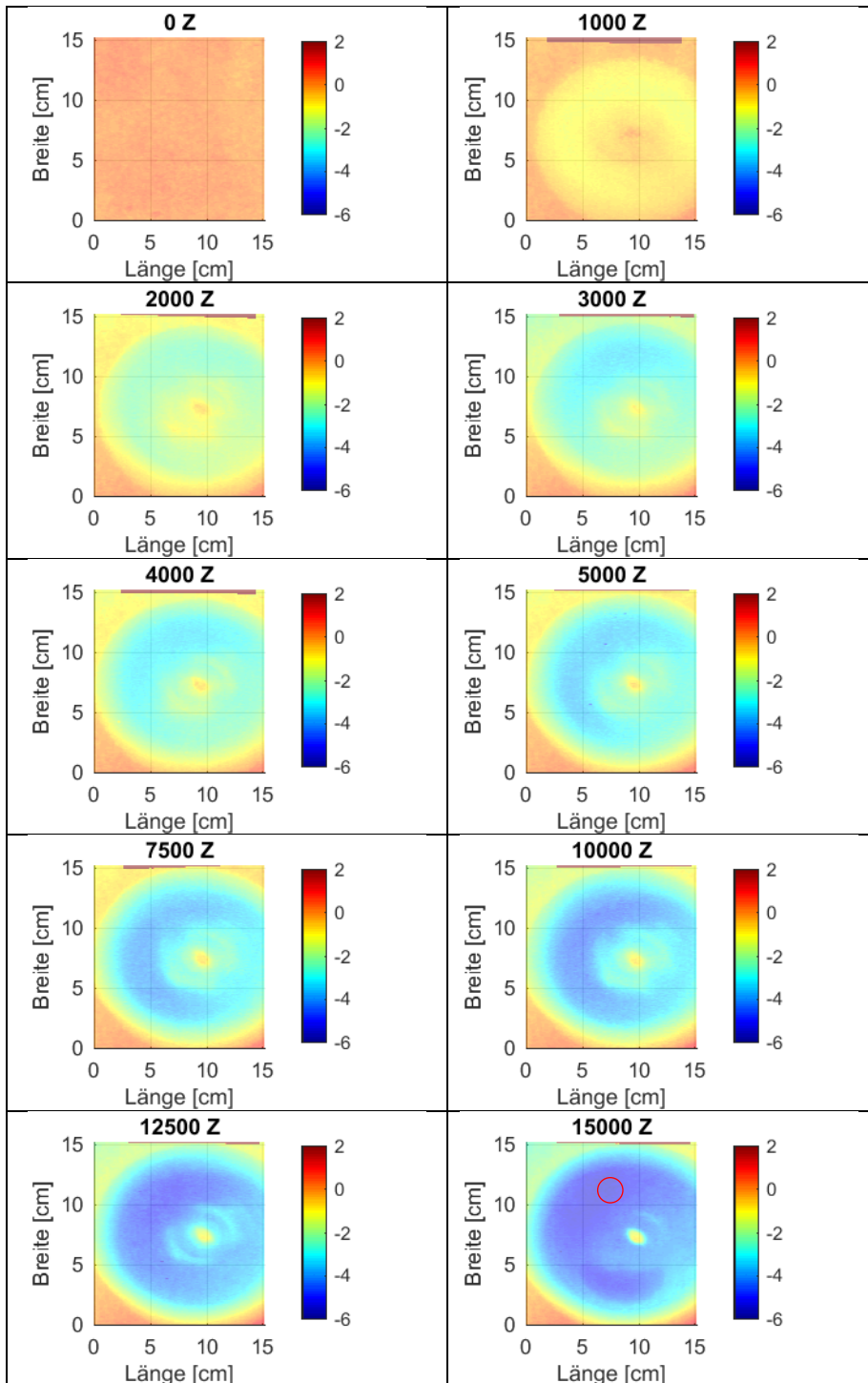
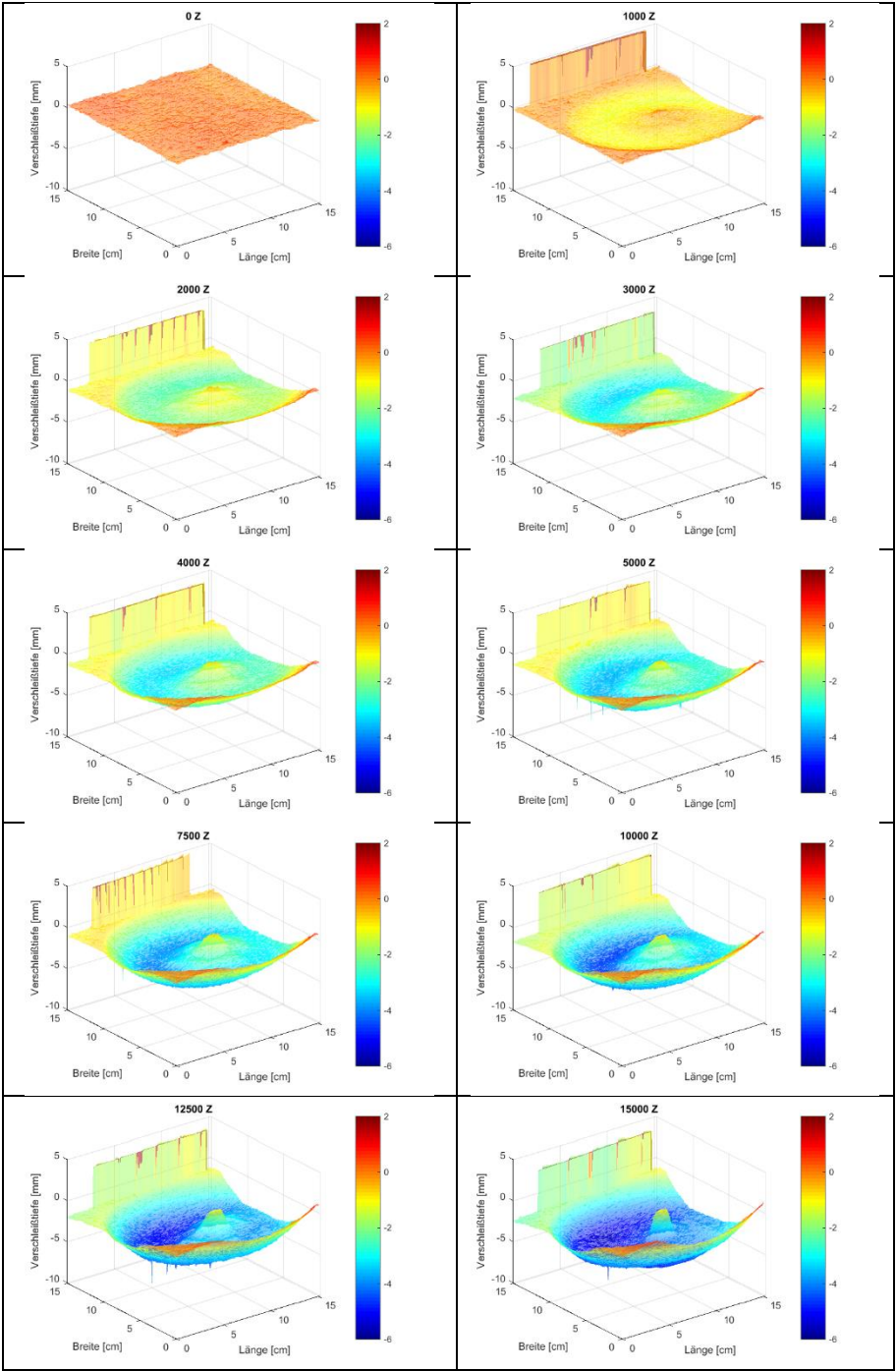


Abb. 8.86: P2\_trocken: Volumenabtrag

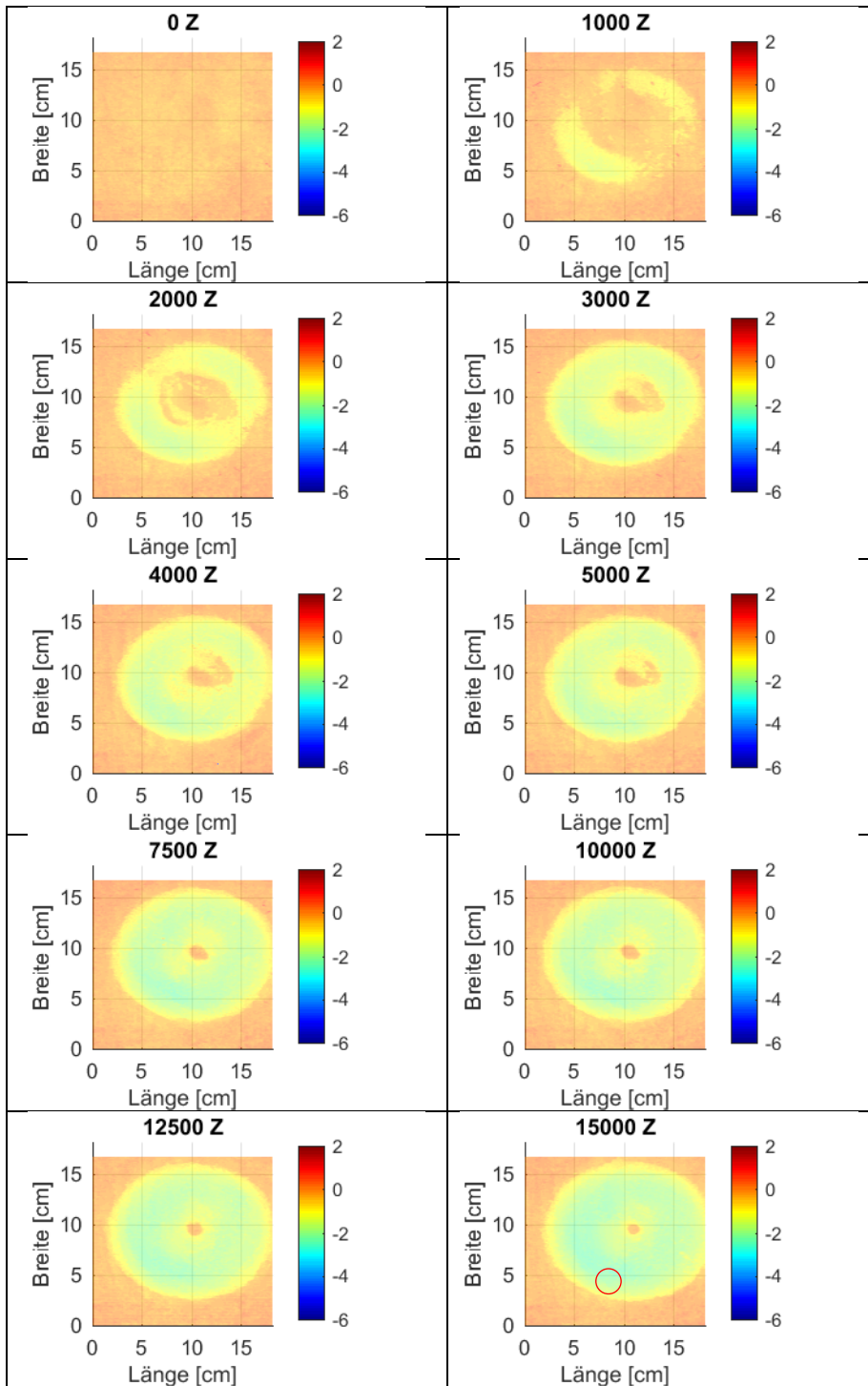
Tab. 8.82: P3\_nass: Laserauswertung Draufsicht



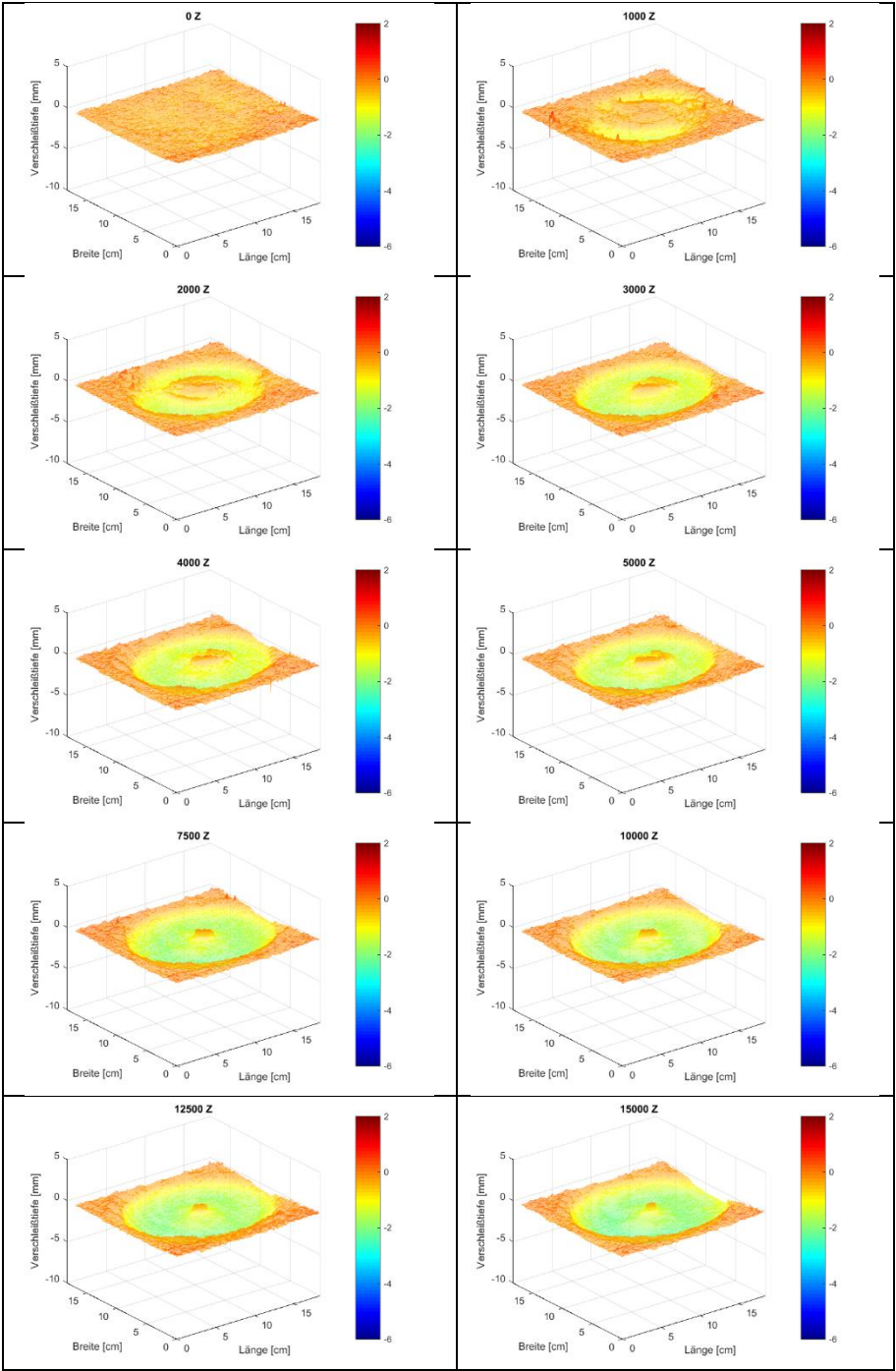
Tab. 8.83: P3\_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht




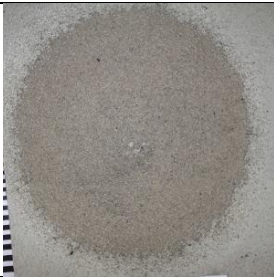


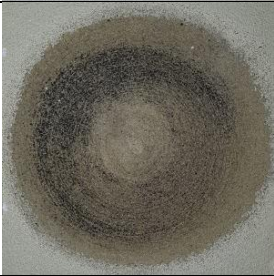

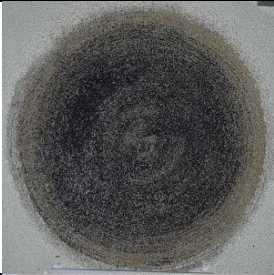



Tab. 8.84: P3\_trocken: Laserauswertung Draufsicht



Tab. 8.85: P3\_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht




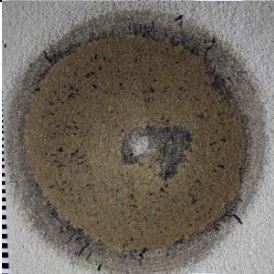
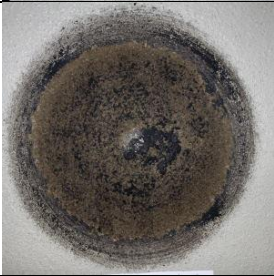
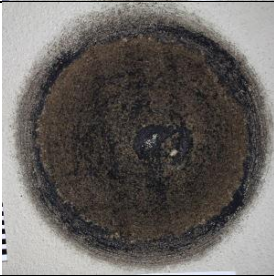
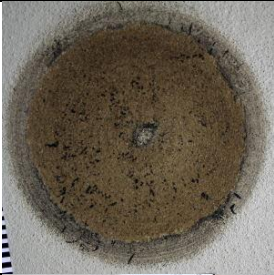
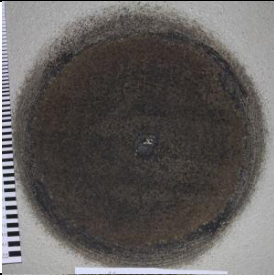
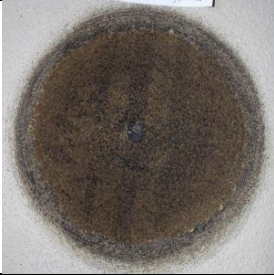



Tab. 8.86: P3\_nass: Fotografische Auswertung

0 Z			1.000 Z
2.000 Z			3.000 Z
4.000 Z			5.000 Z
7.500 Z			10.000 Z
12.500 Z			15.000 Z



Tab. 8.87: P3\_trocken: Fotografische Auswertung

0 Z				1.000 Z
2.000 Z				3.000 Z
4.000 Z				5.000 Z
7.500 Z				10.000 Z
12.500 Z				15.000 Z



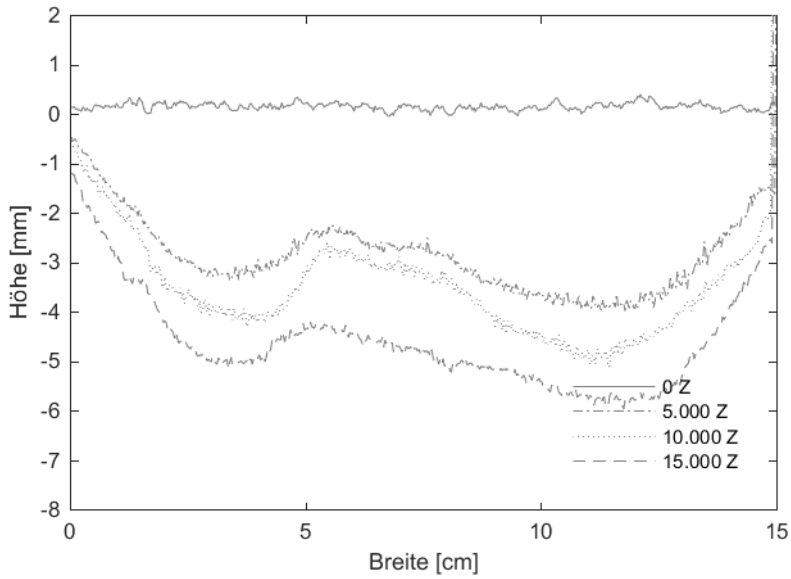


Abb. 8.87: P3\_nass: Querschnitt in Plattenmitte

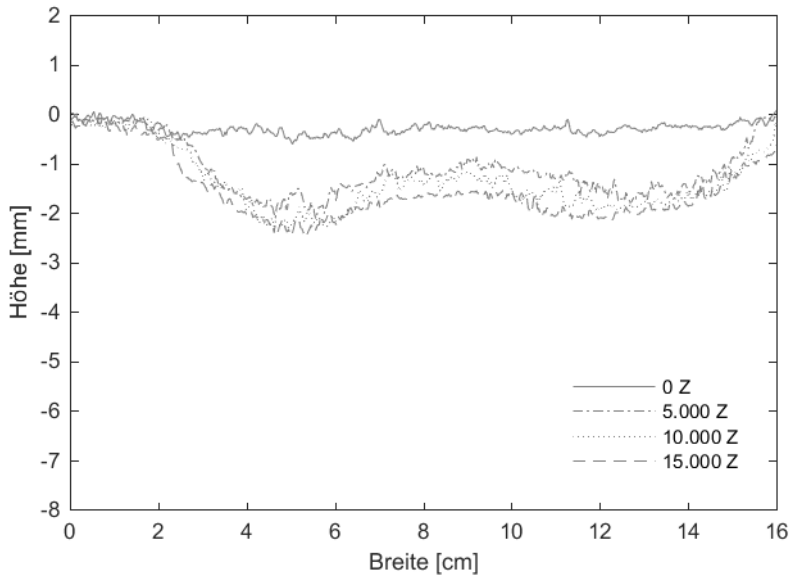


Abb. 8.88: P3\_trocken: Querschnitt in Plattenmitte

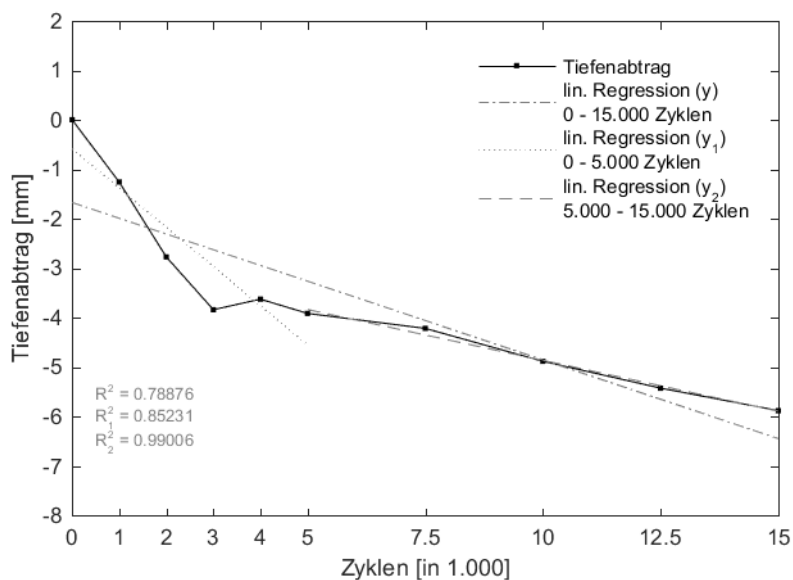


Abb. 8.89: P3\_nass: Maximale Verschleißtiefe

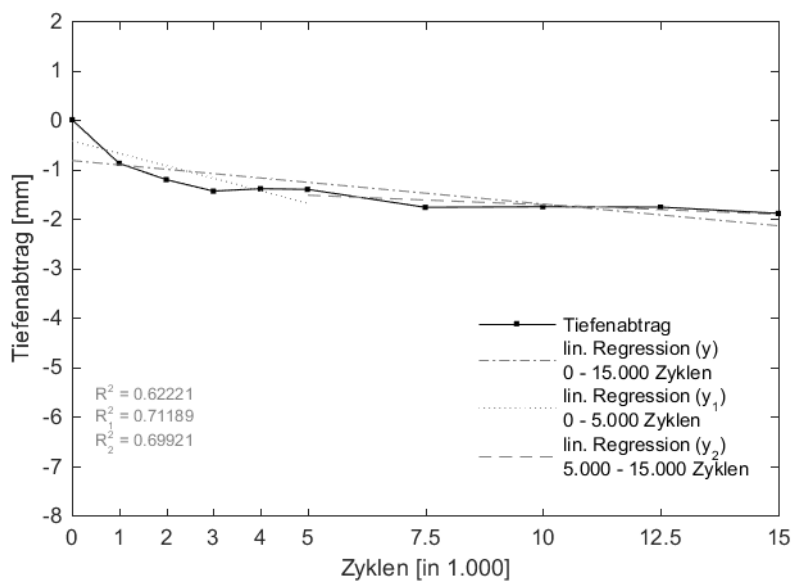


Abb. 8.90: P3\_trocken: Maximale Verschleißtiefe

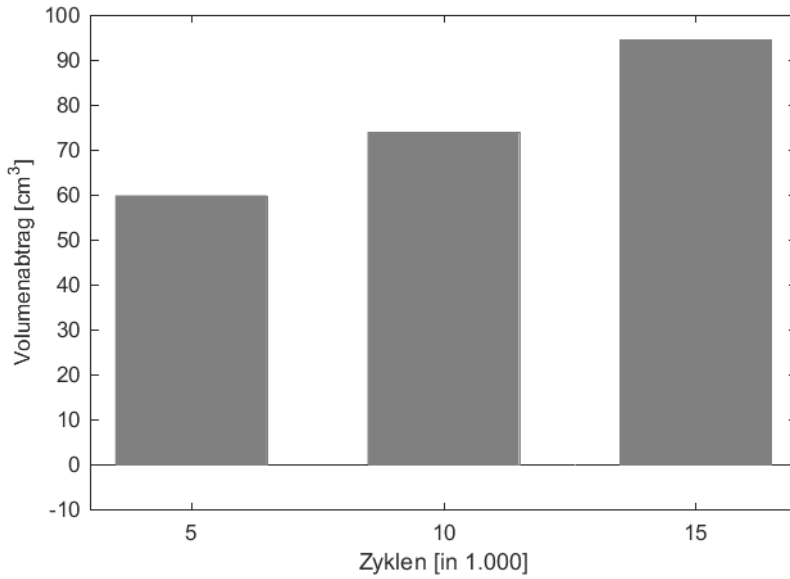


Abb. 8.91: P3\_nass: Volumenabtrag

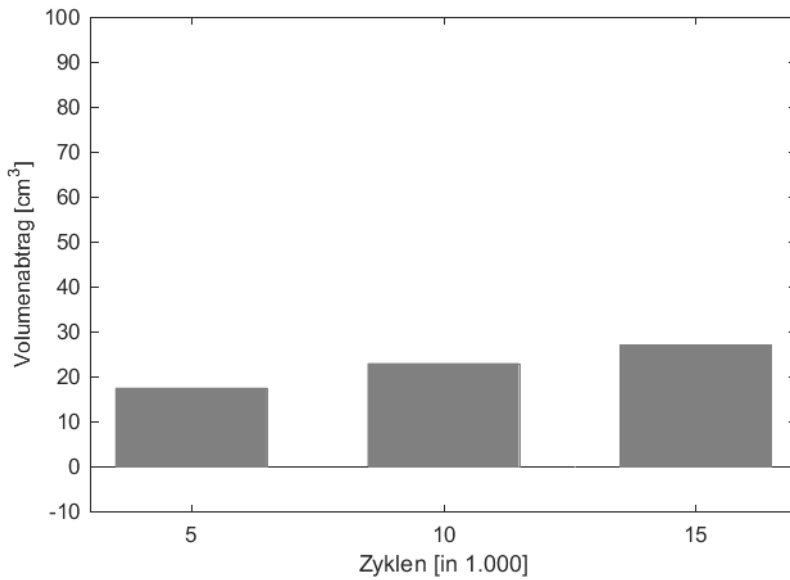
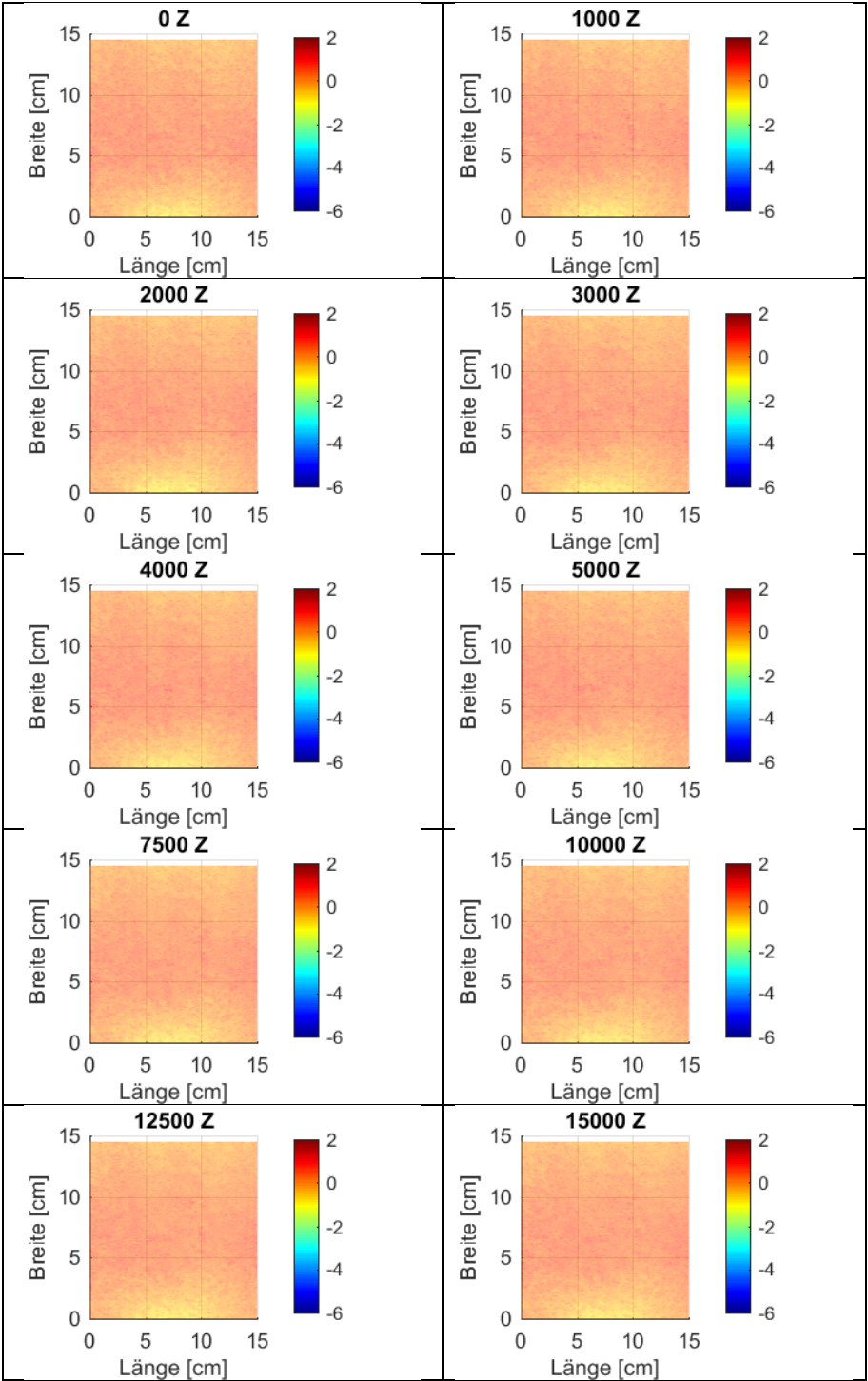
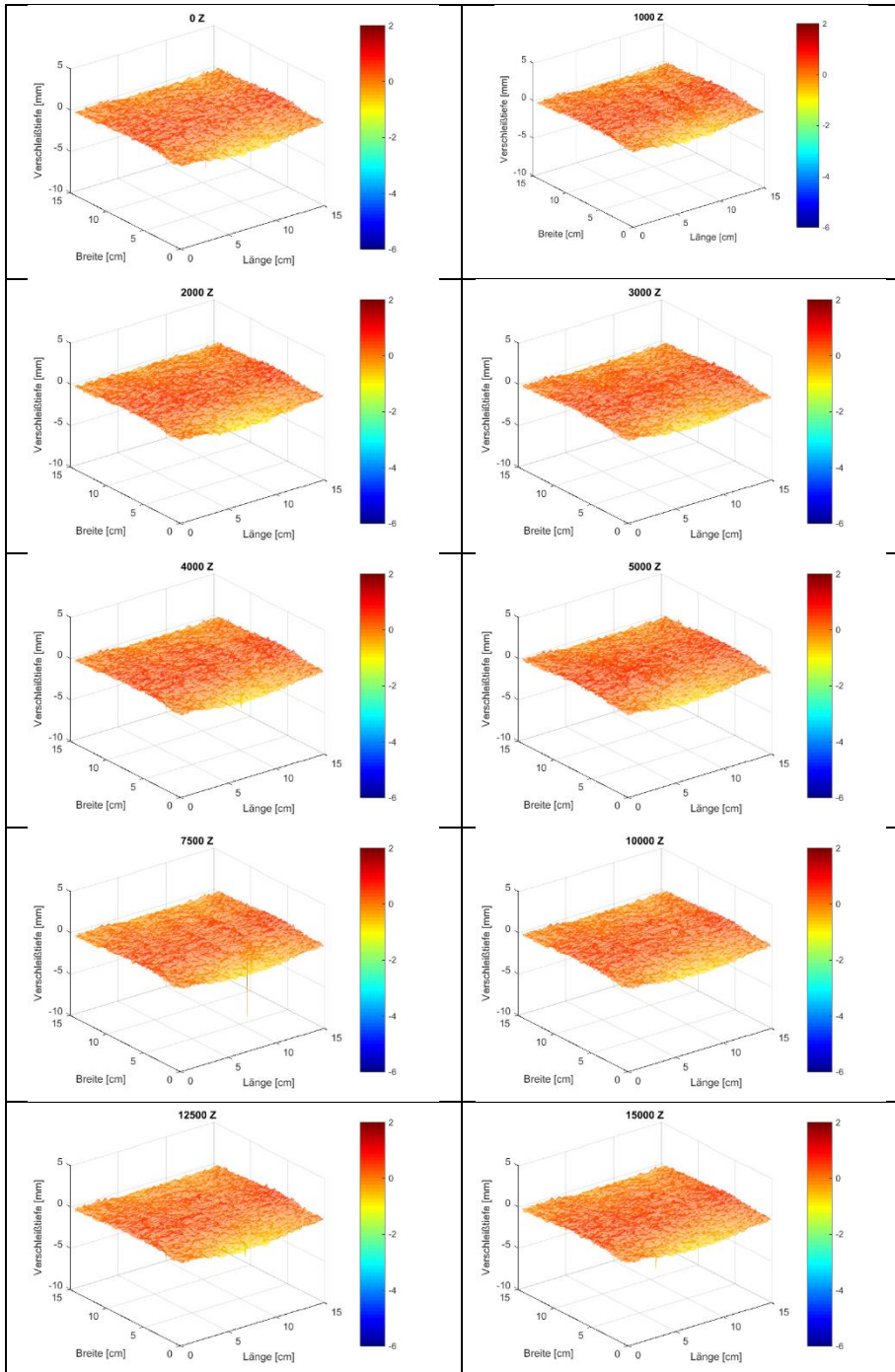


Abb. 8.92: P3\_trocken: Volumenabtrag

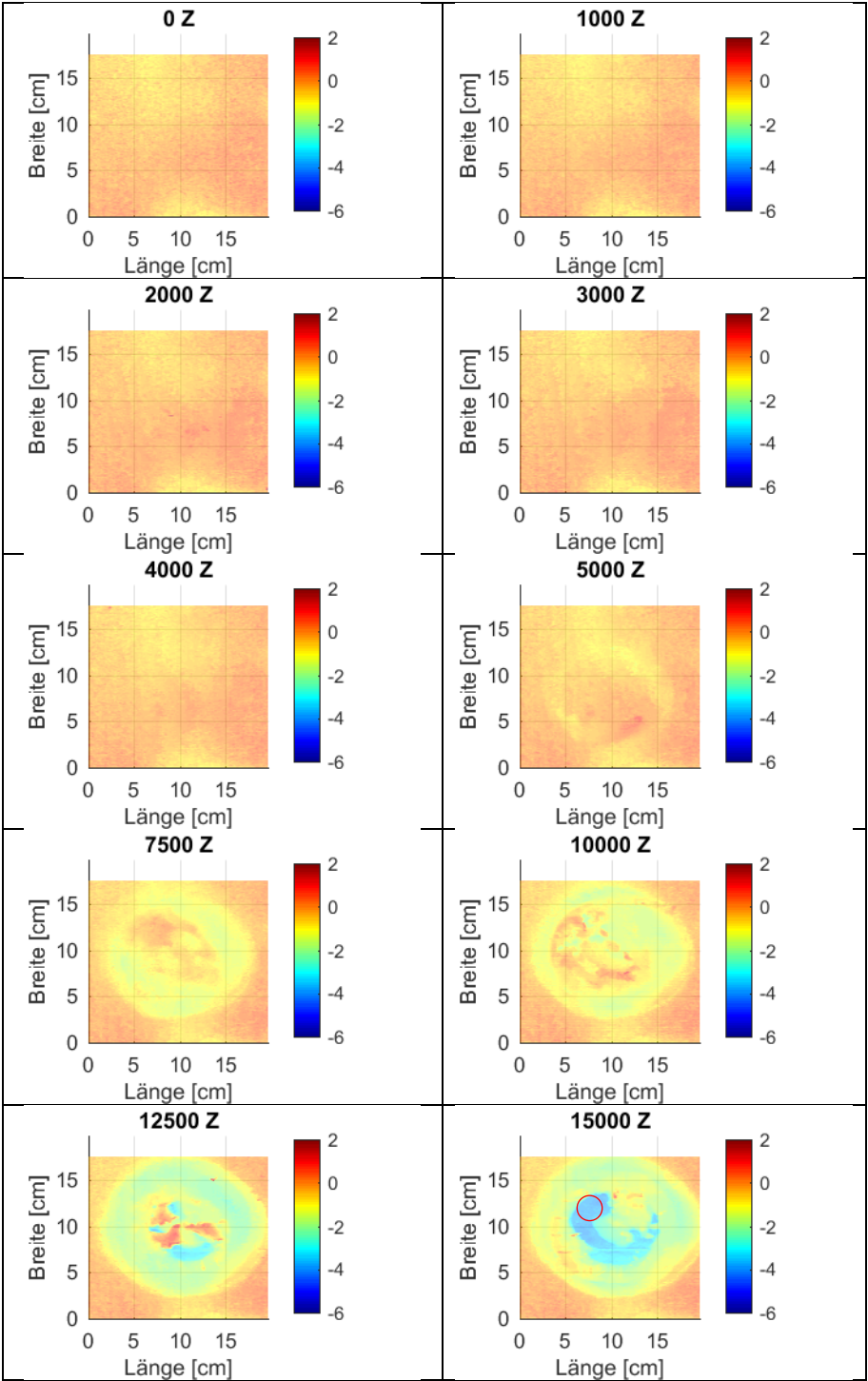
Tab. 8.88: P4\_nass: Laserauswertung Draufsicht



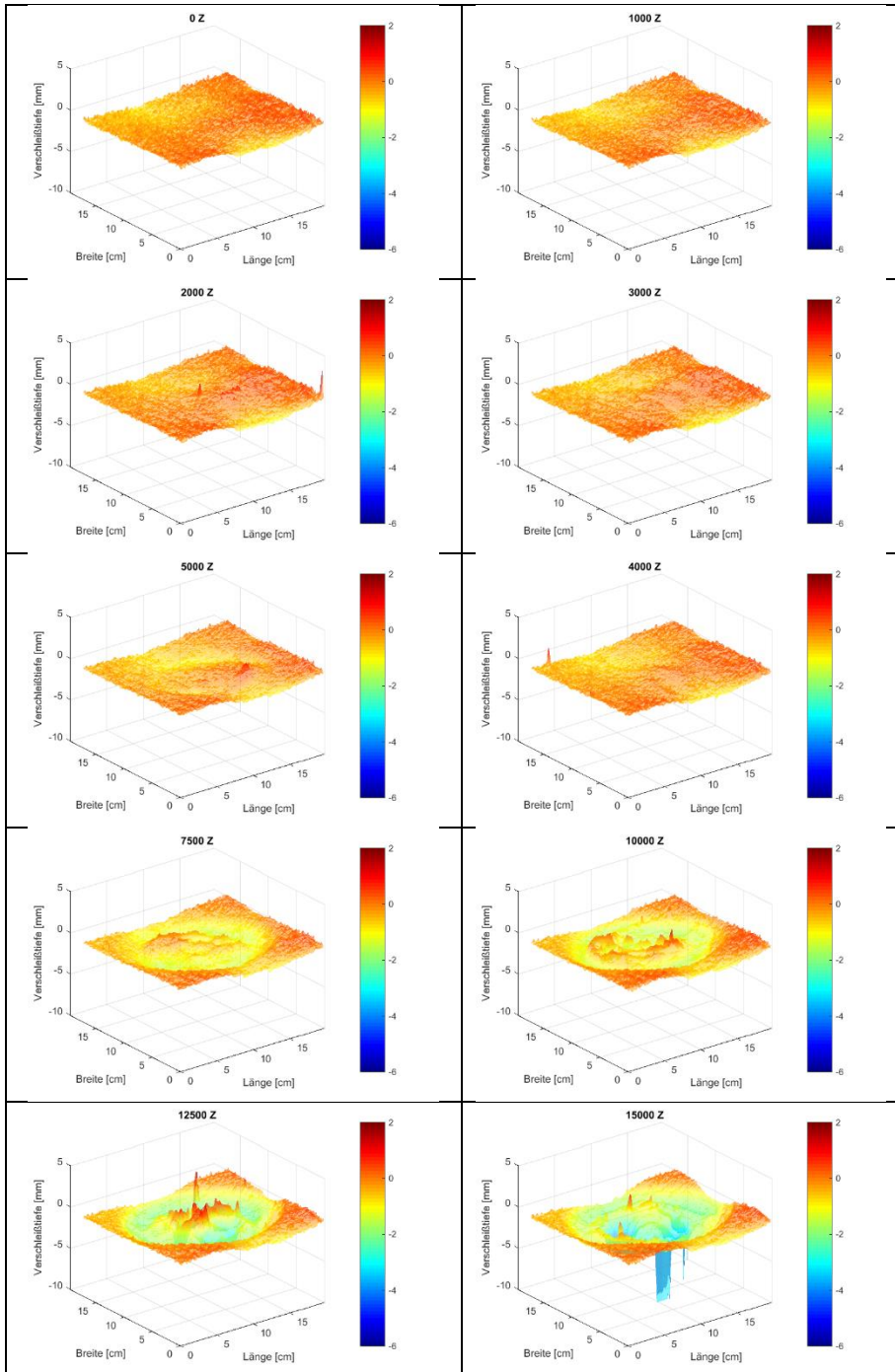
Tab. 8.89: P4\_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.90: P4\_trocken: Laserauswertung Draufsicht








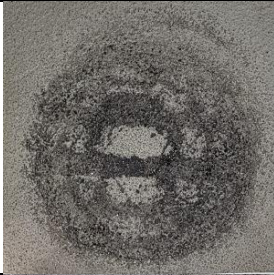




Tab. 8.91: P4\_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht




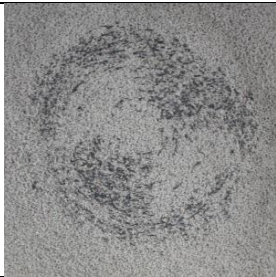
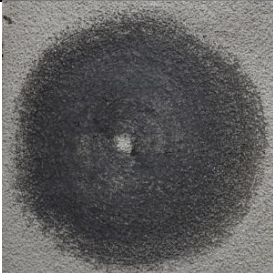
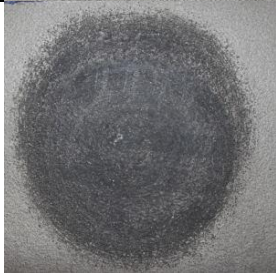
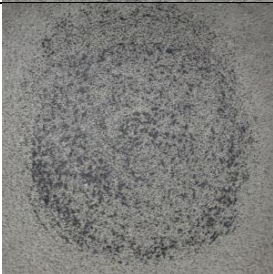







Tab. 8.92: P4\_nass: Fotografische Auswertung

0 Z						1.000 Z
2.000 Z						3.000 Z
4.000 Z						5.000 Z
7.500 Z						10.000 Z
12.500 Z						15.000 Z



Tab. 8.93: P4\_trocken: Fotografische Auswertung

0 Z						1.000 Z
2.000 Z						3.000 Z
4.000 Z						5.000 Z
7.500 Z						10.000 Z
12.500 Z						15.000 Z

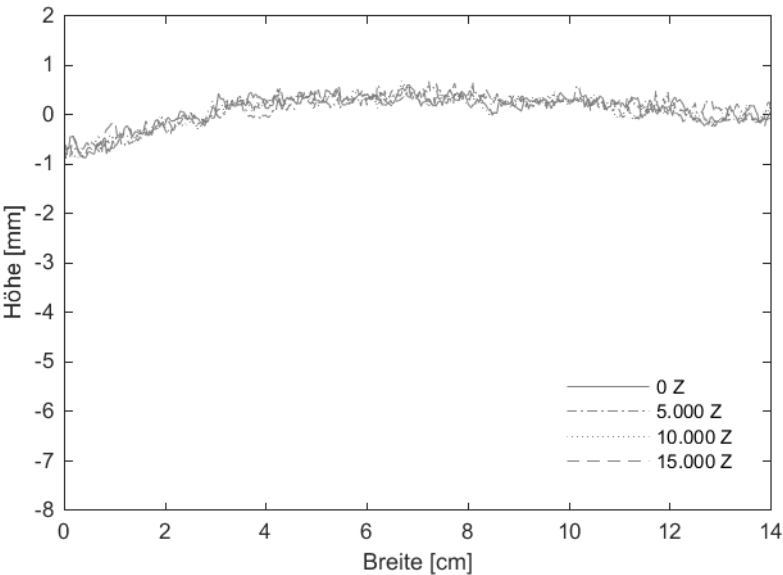


Abb. 8.93: P4\_nass: Querschnitt in Plattenmitte

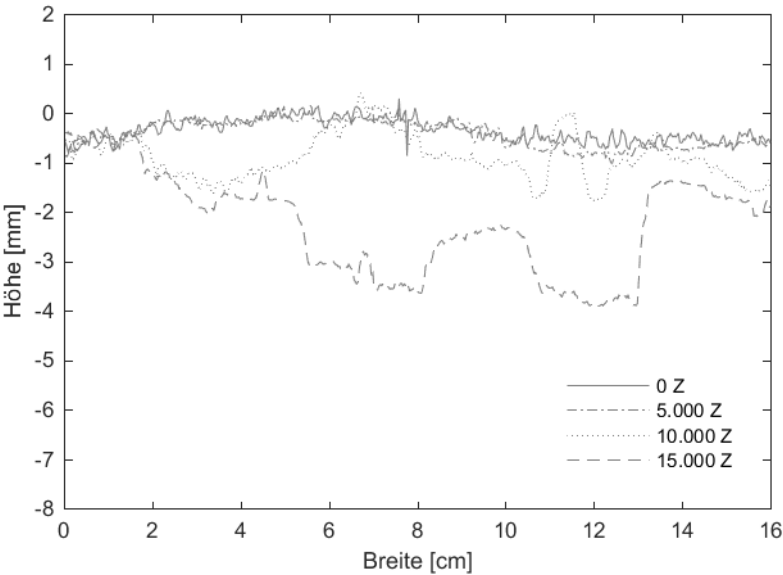


Abb. 8.94: P4\_trocken: Querschnitt in Plattenmitte

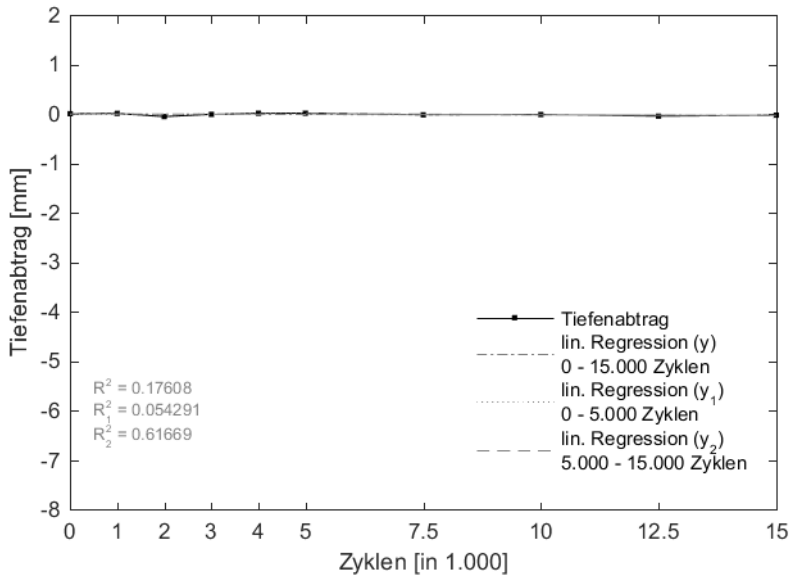


Abb. 8.95: P4\_nass: Maximale Verschleißtiefe

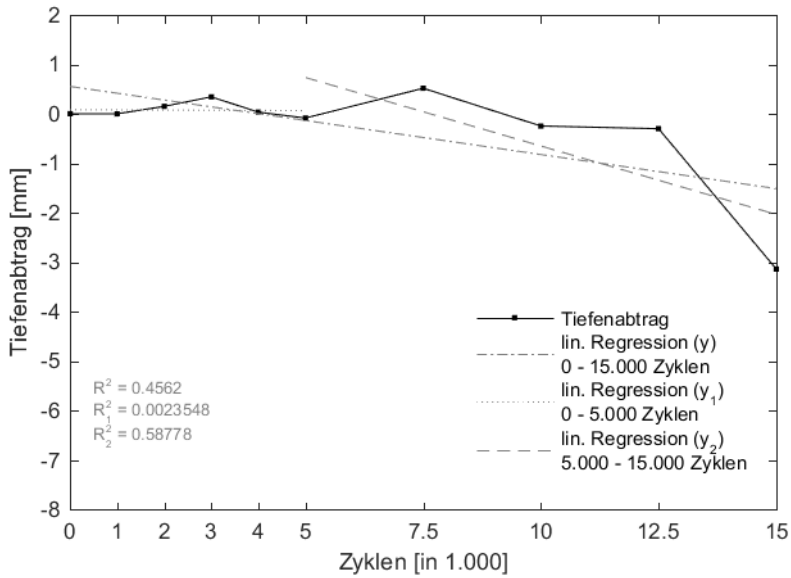


Abb. 8.96: P4\_trocken: Maximale Verschleißtiefe

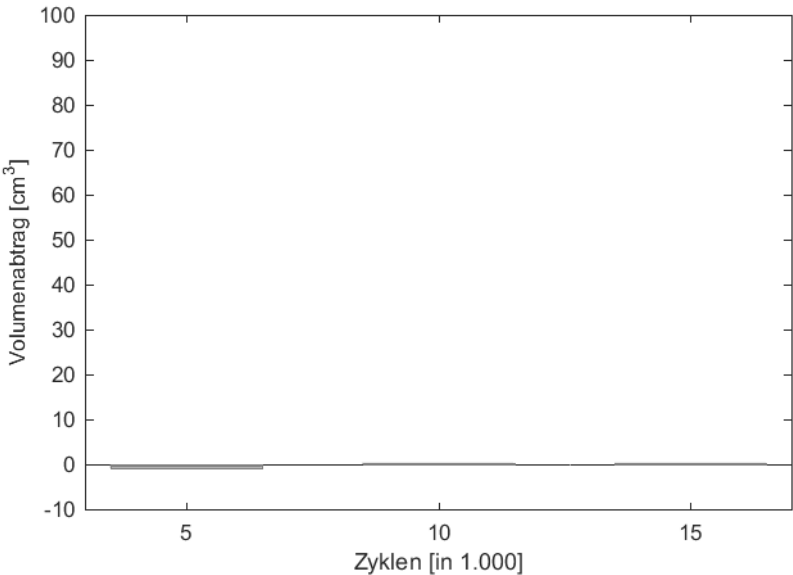


Abb. 8.97: P4\_nass: Volumenabtrag

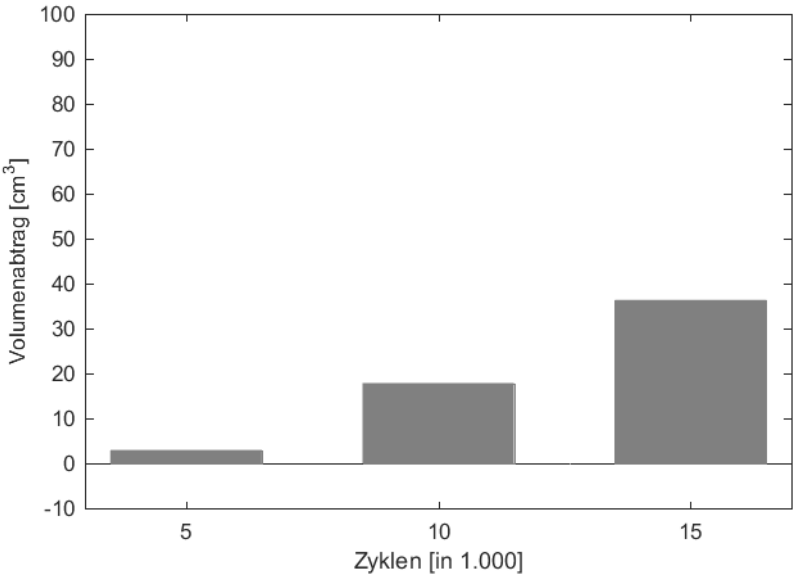
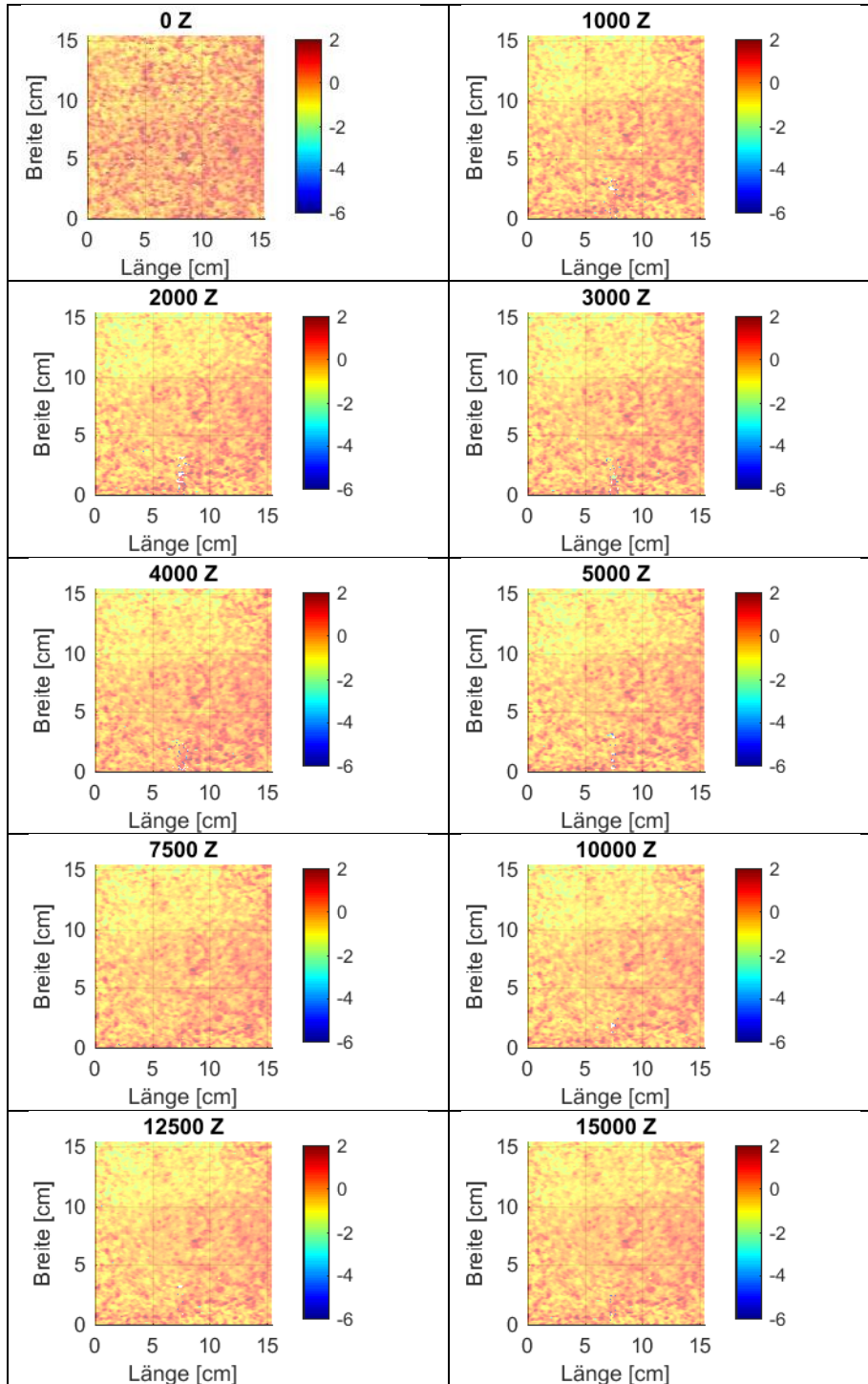
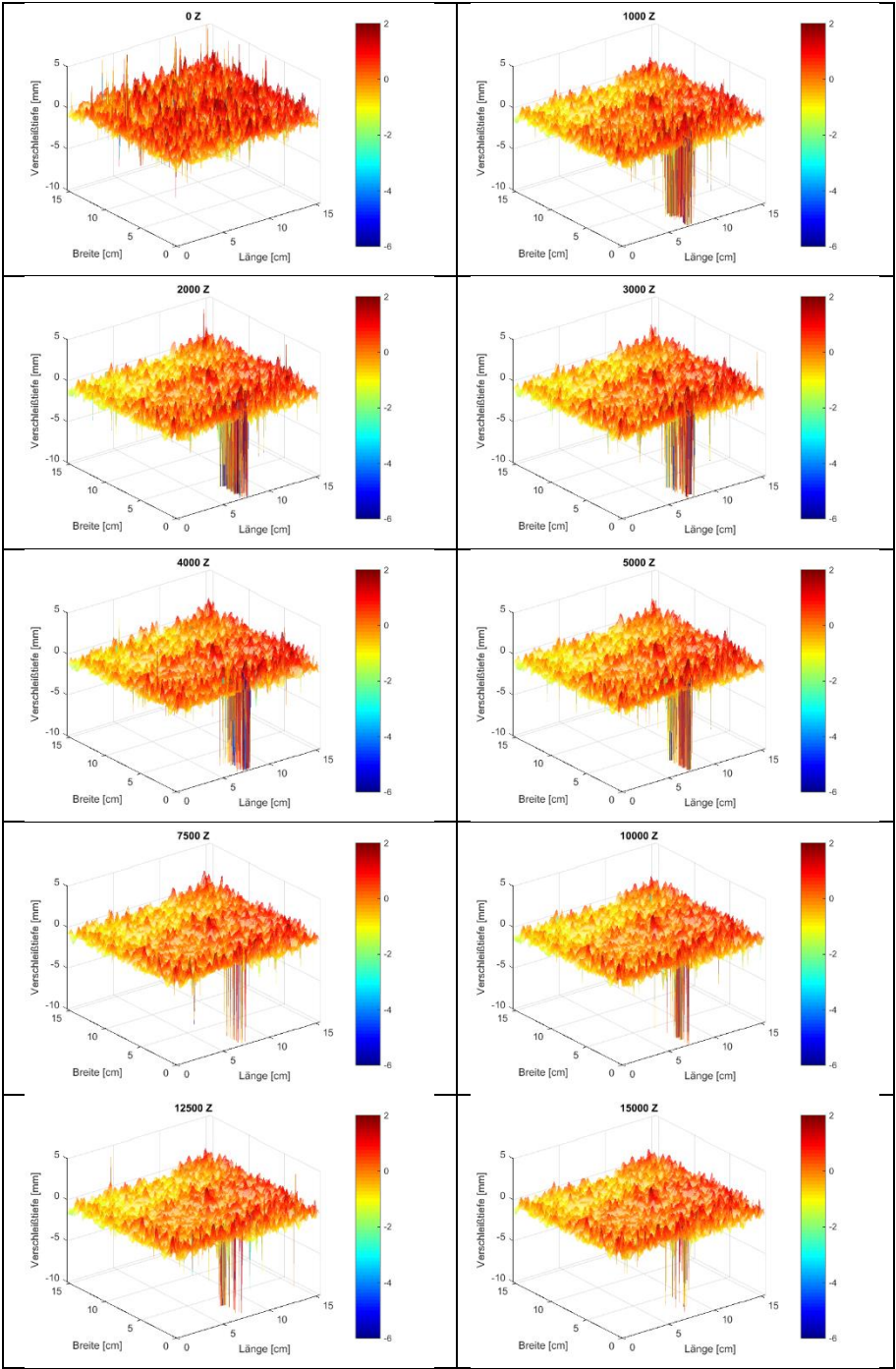


Abb. 8.98: P4\_trocken: Volumenabtrag

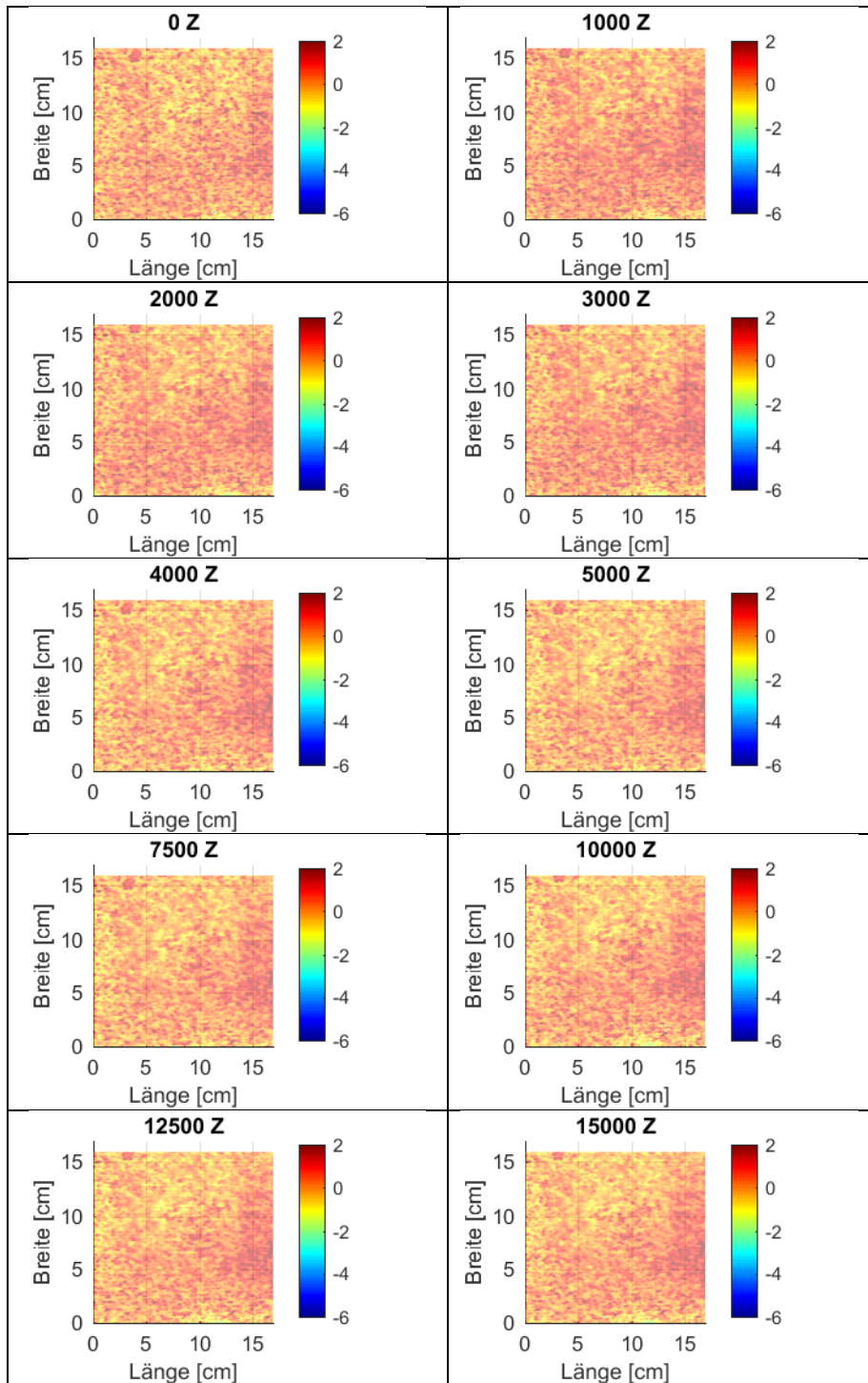
Tab. 8.94: P5\_nass: Laserauswertung Draufsicht



Tab. 8.95: P5\_nass: Laserauswertung 3D-Ansicht

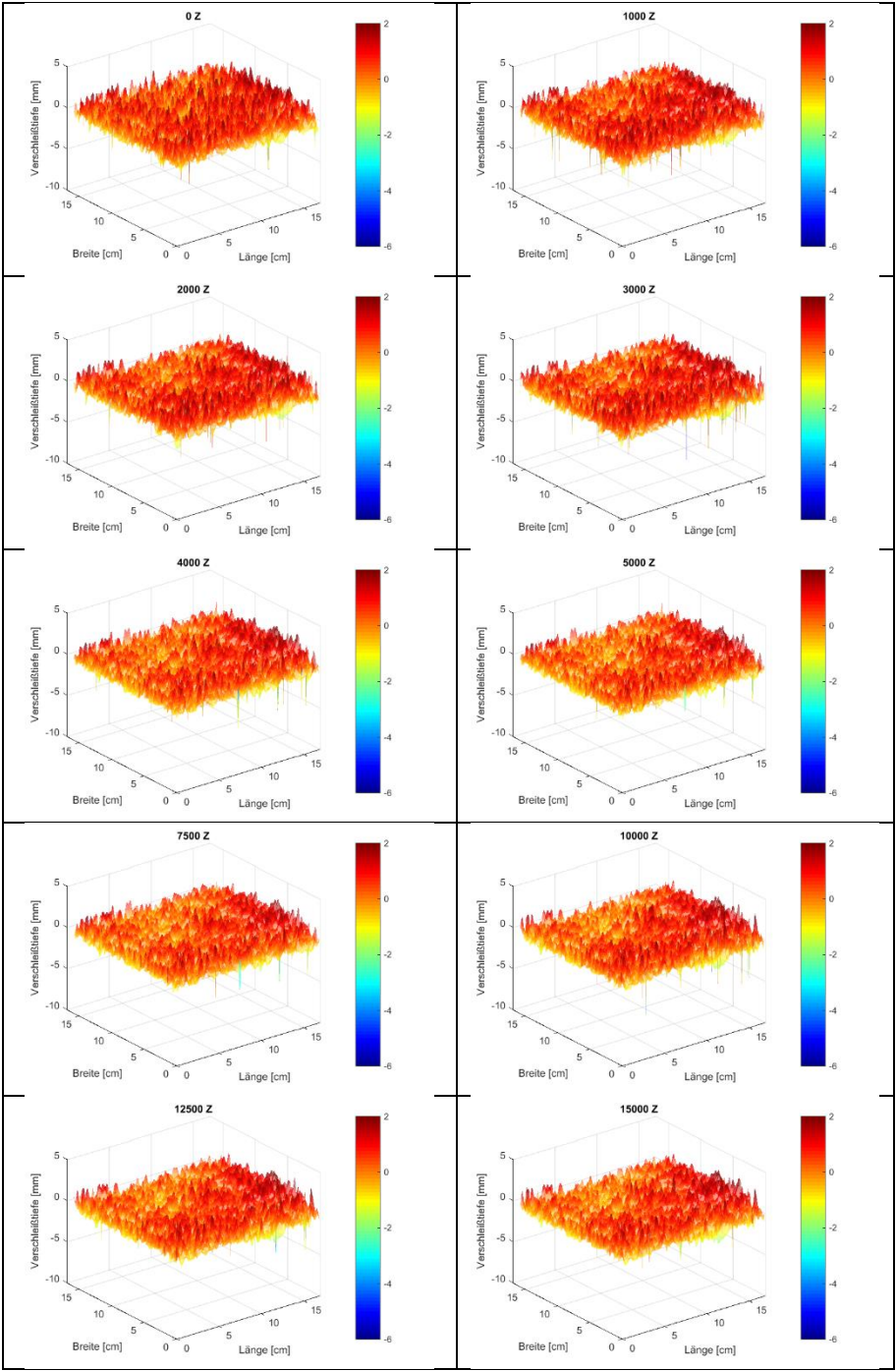


Tab. 8.96: P5\_trocken: Laserauswertung Draufsicht





Tab. 8.97: P5\_trocken: Laserauswertung 3D-Ansicht











Tab. 8.98: P5\_nass: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z
7.500 Z					10.000 Z
12.500 Z					15.000 Z

Tab. 8.99: P5\_trocken: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z
7.500 Z					10.000 Z
12.500 Z					15.000 Z

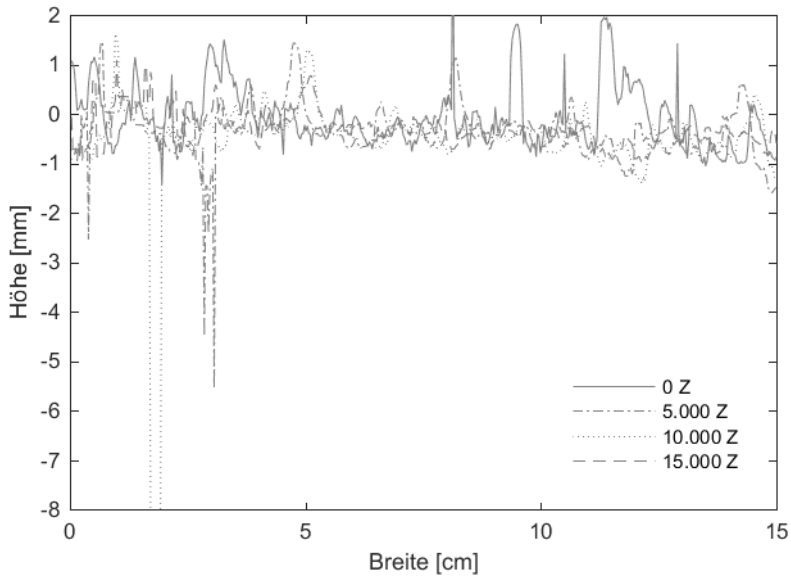


Abb. 8.99: P5\_nass: Querschnitt in Plattenmitte

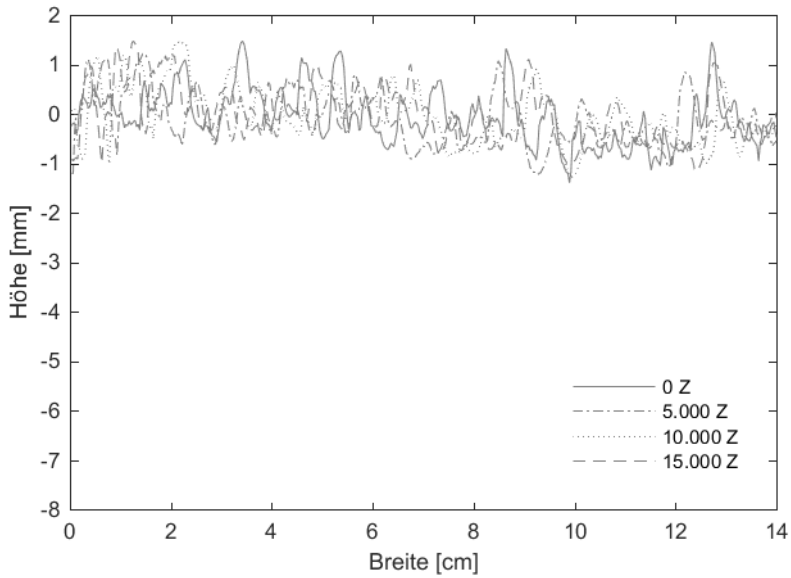


Abb. 8.100: P5\_trocken: Querschnitt in Plattenmitte

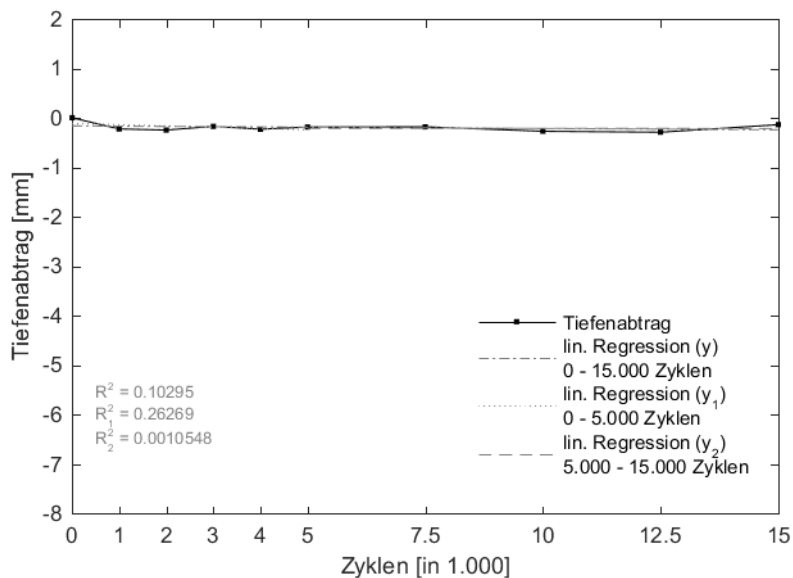


Abb. 8.101: P5\_nass: Maximale Verschleißtiefe

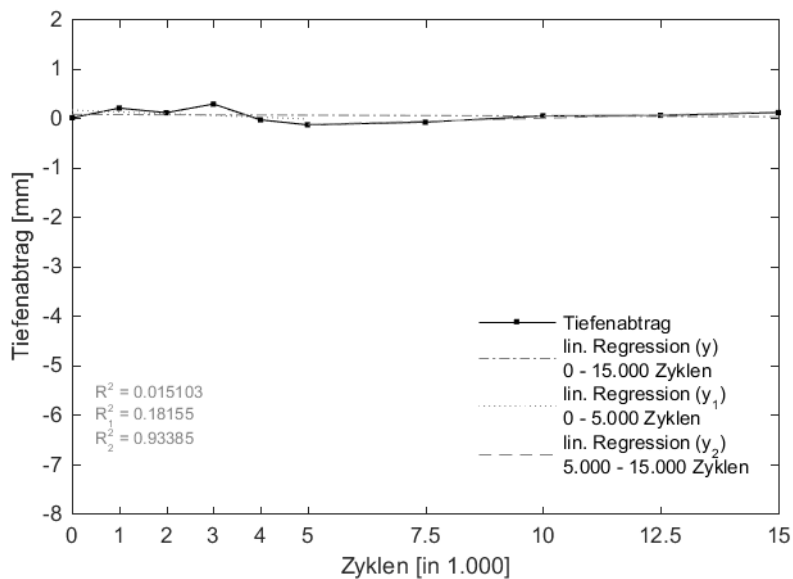


Abb. 8.102: P5\_trocken: Maximale Verschleißtiefe

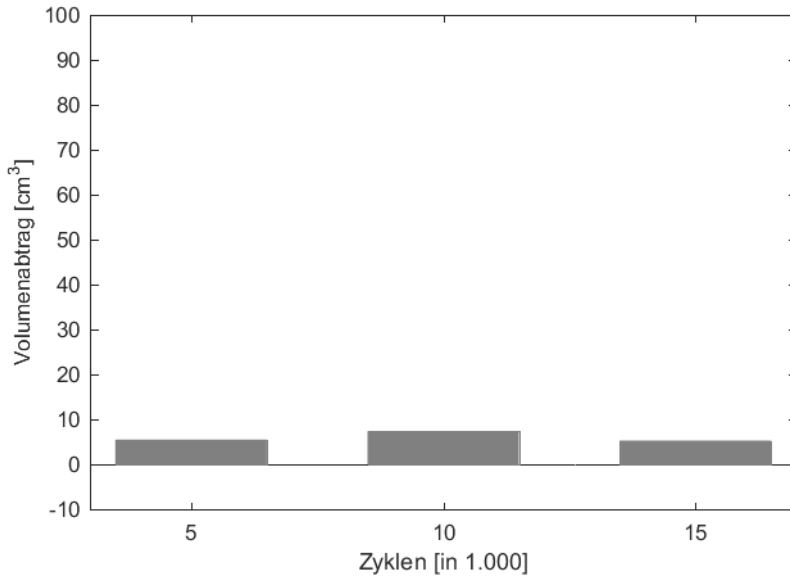


Abb. 8.103: P5\_nass: Volumenabtrag

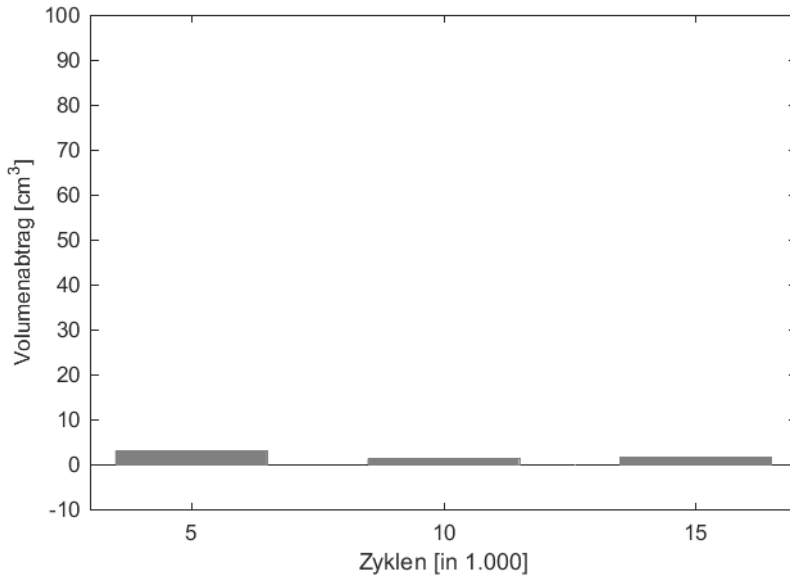
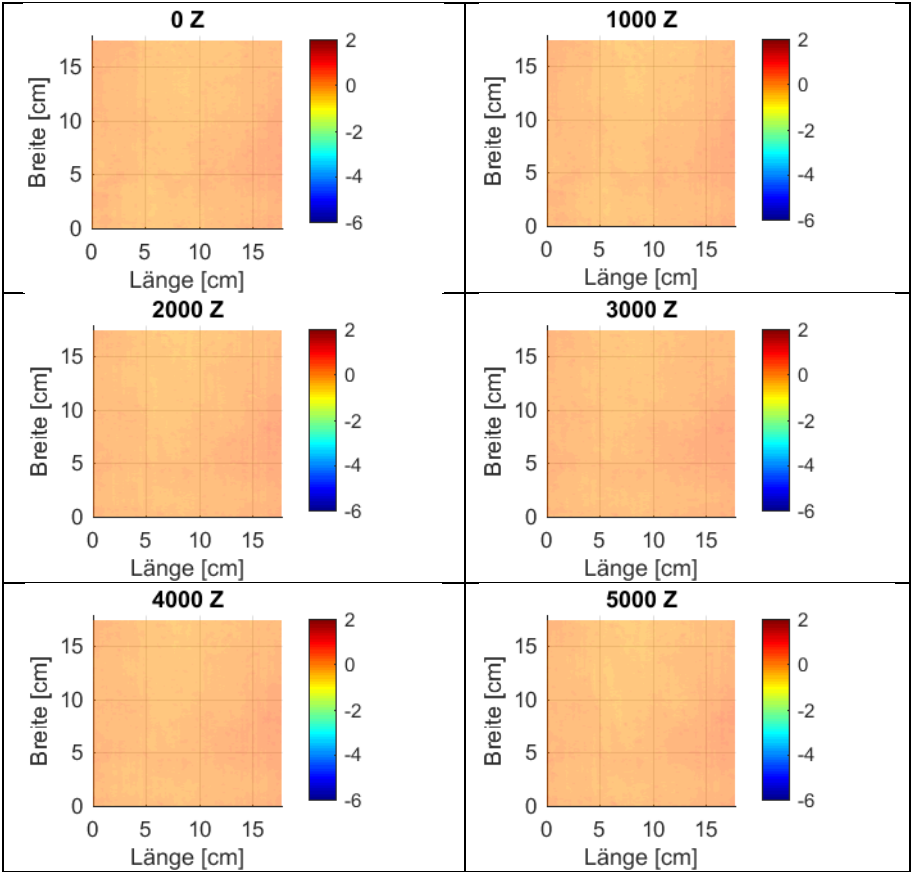


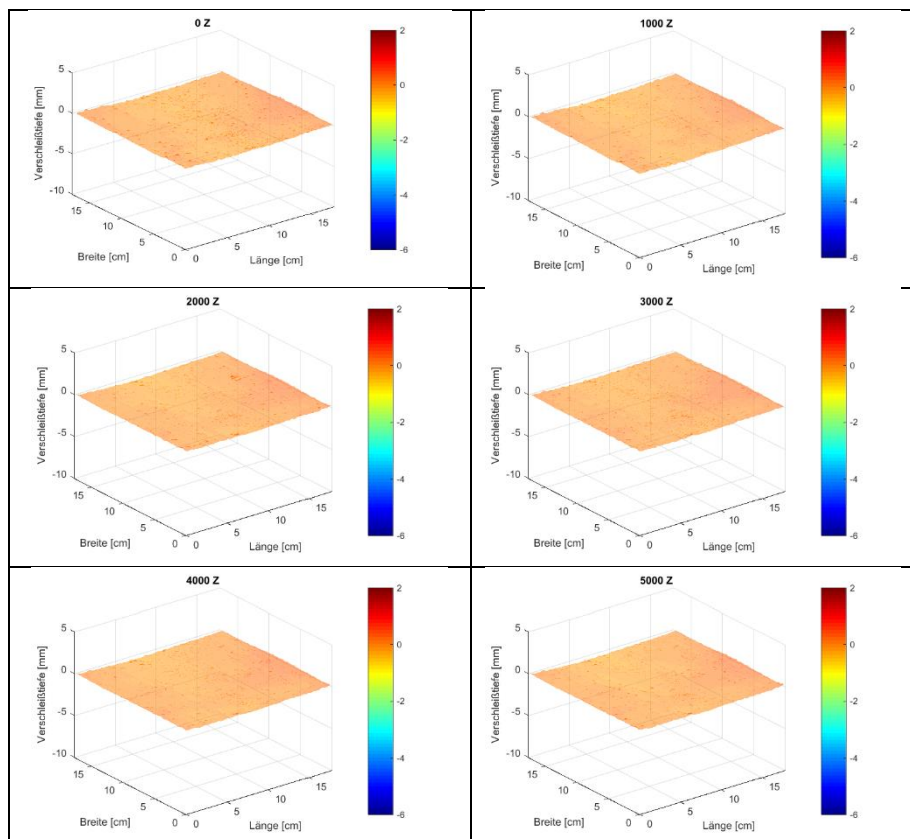
Abb. 8.104: P5\_trocken: Volumenabtrag

Anhang H

Tab. 8.100: P1\_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht

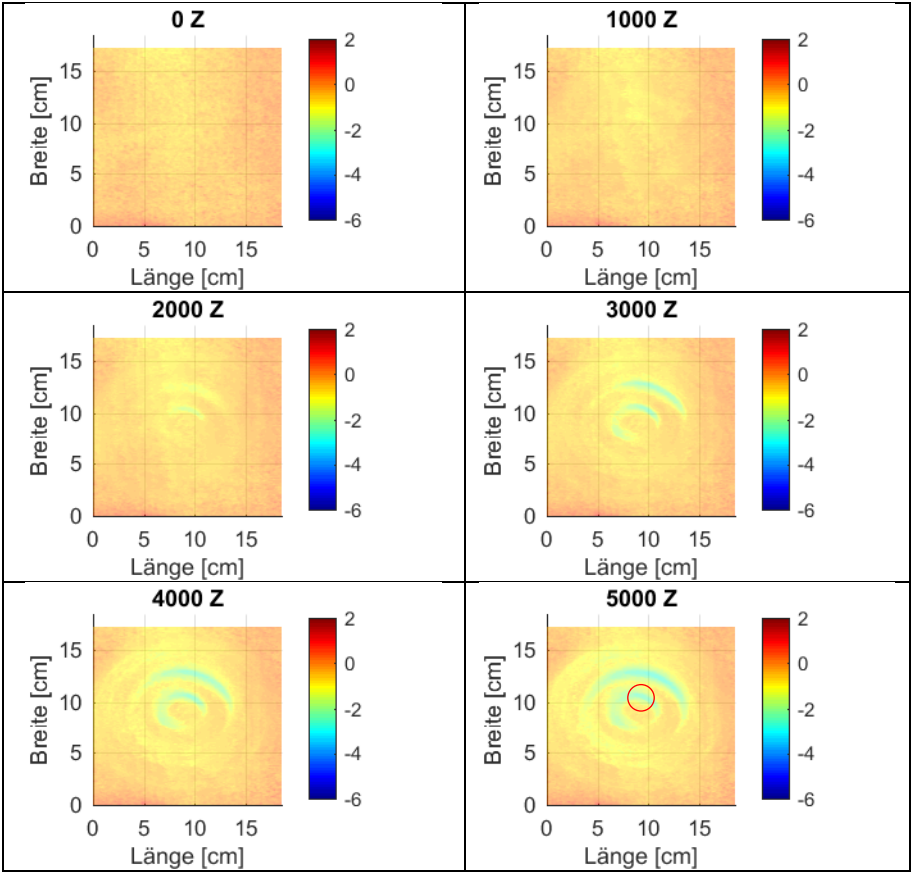


Tab. 8.101: P1\_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht



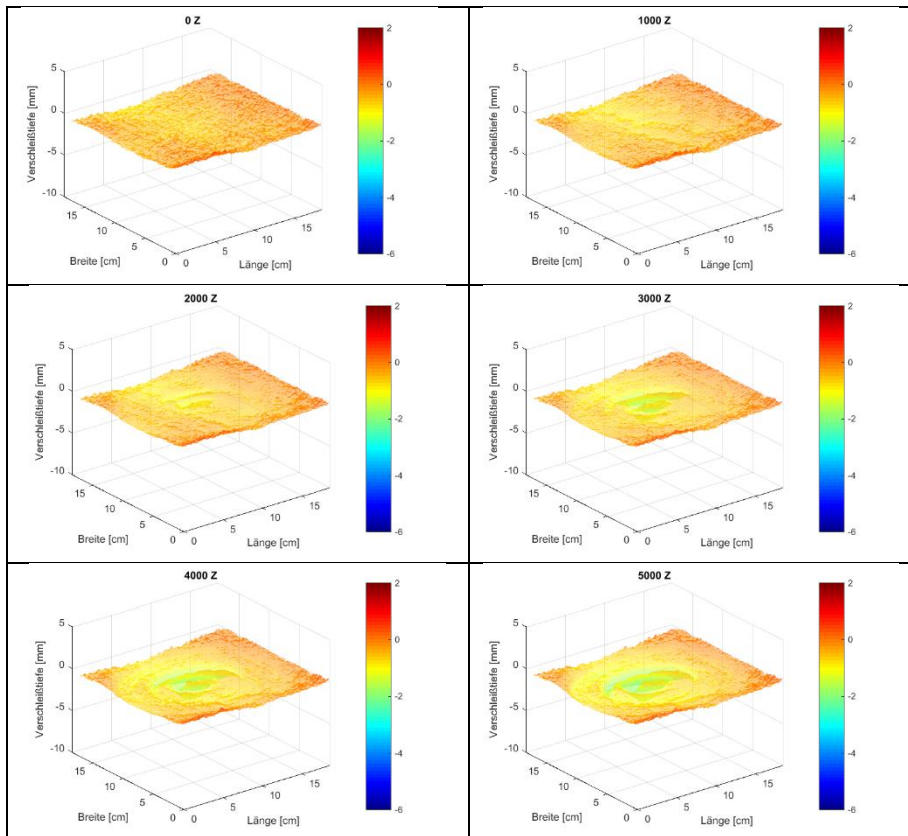


Tab. 8.102: P1\_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht






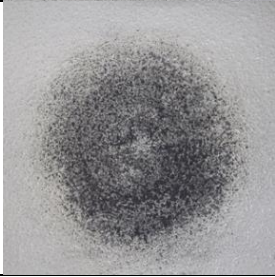





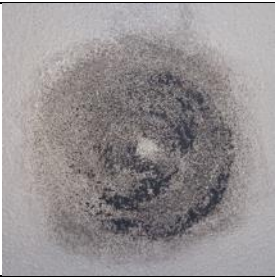
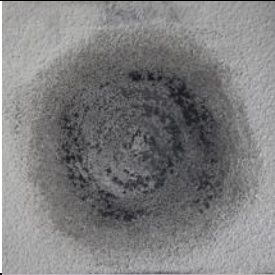
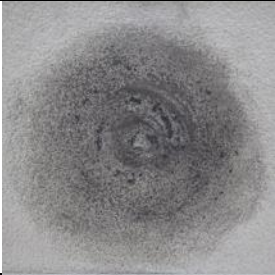

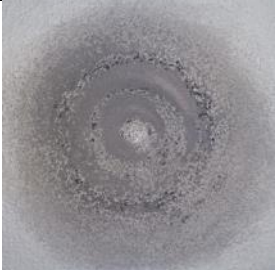
Tab. 8.103: P1\_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.104: P1\_ohne Splitt: Fotografische Auswertung

0 Z							1.000 Z
2.000 Z							3.000 Z
4.000 Z							5.000 Z

Tab. 8.105: P1\_mit Splitt: Fotografische Auswertung

0 Z							1.000 Z
2.000 Z							3.000 Z
4.000 Z							5.000 Z

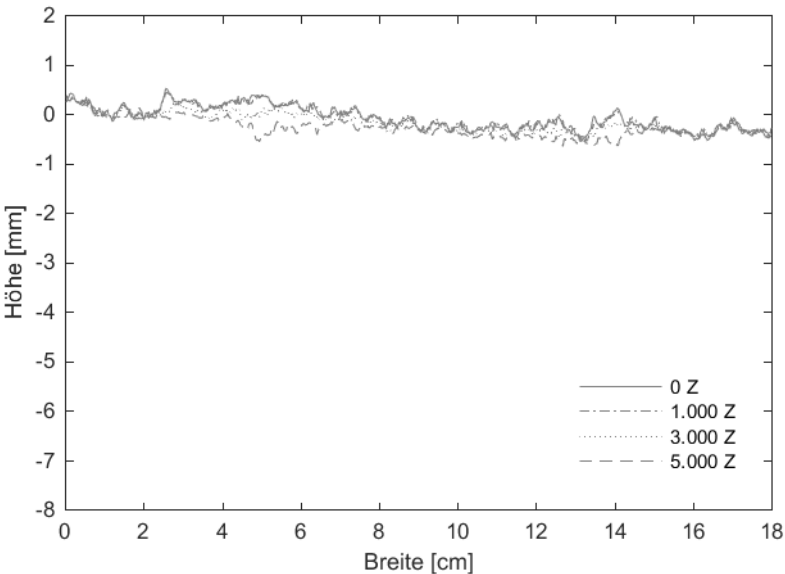


Abb. 8.105: P1\_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

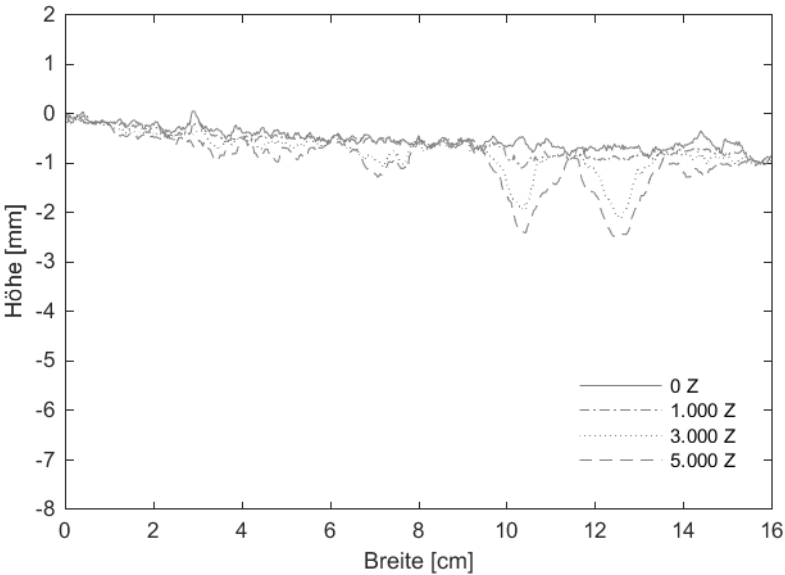


Abb. 8.106: P1\_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

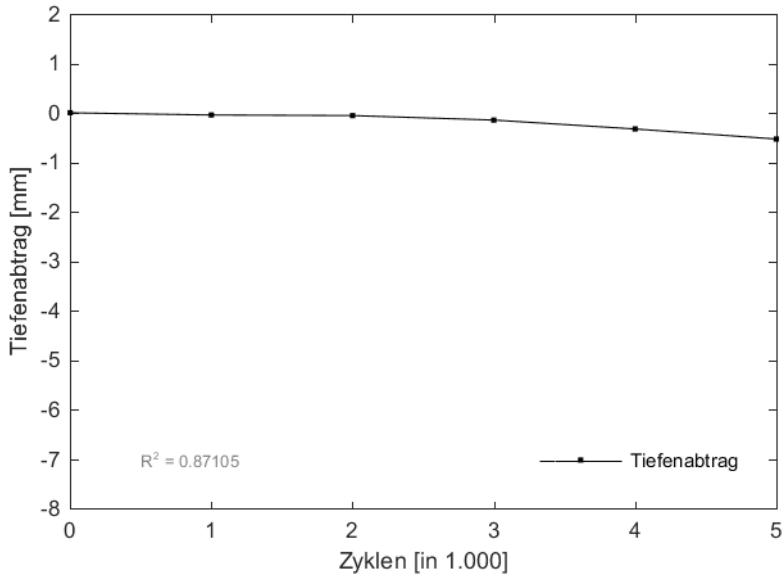


Abb. 8.107: P1\_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe

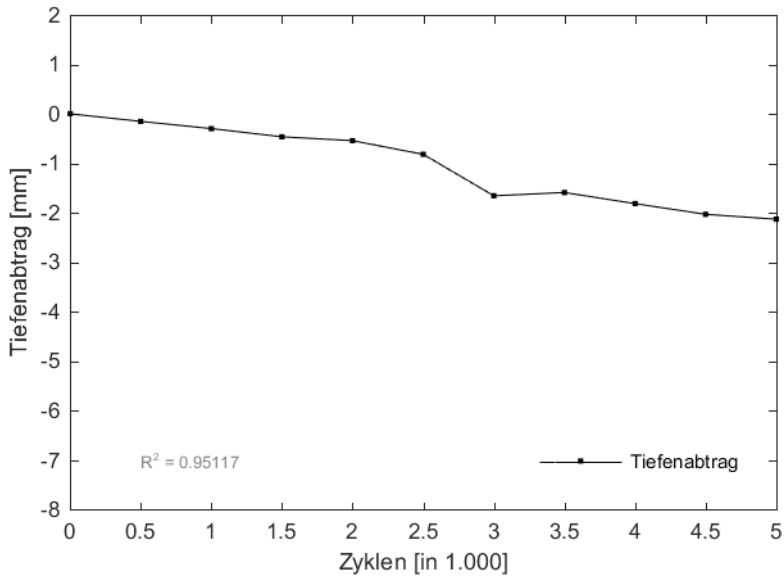


Abb. 8.108: P1\_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe

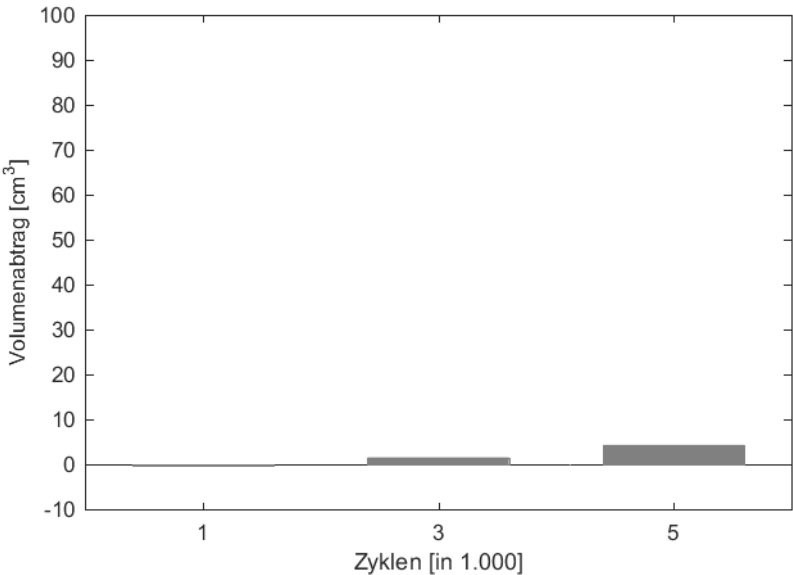


Abb. 8.109: P1\_ohne Splitt: Volumenabtrag

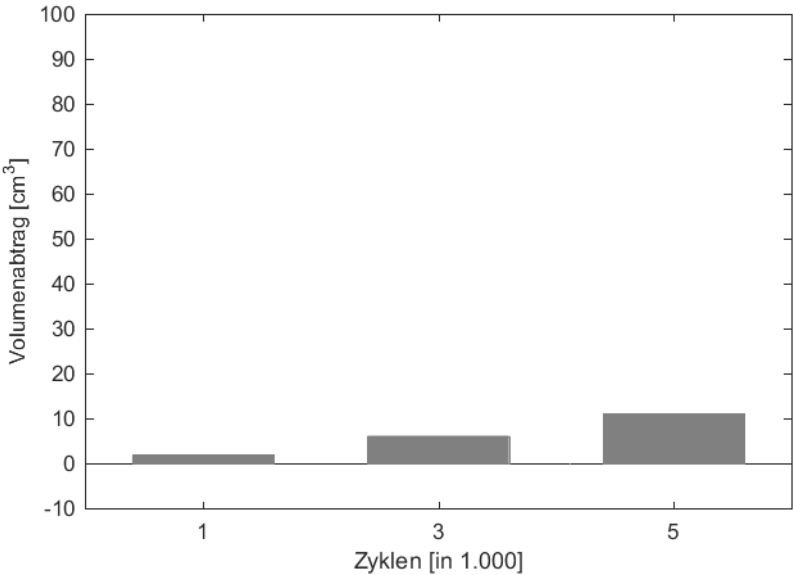
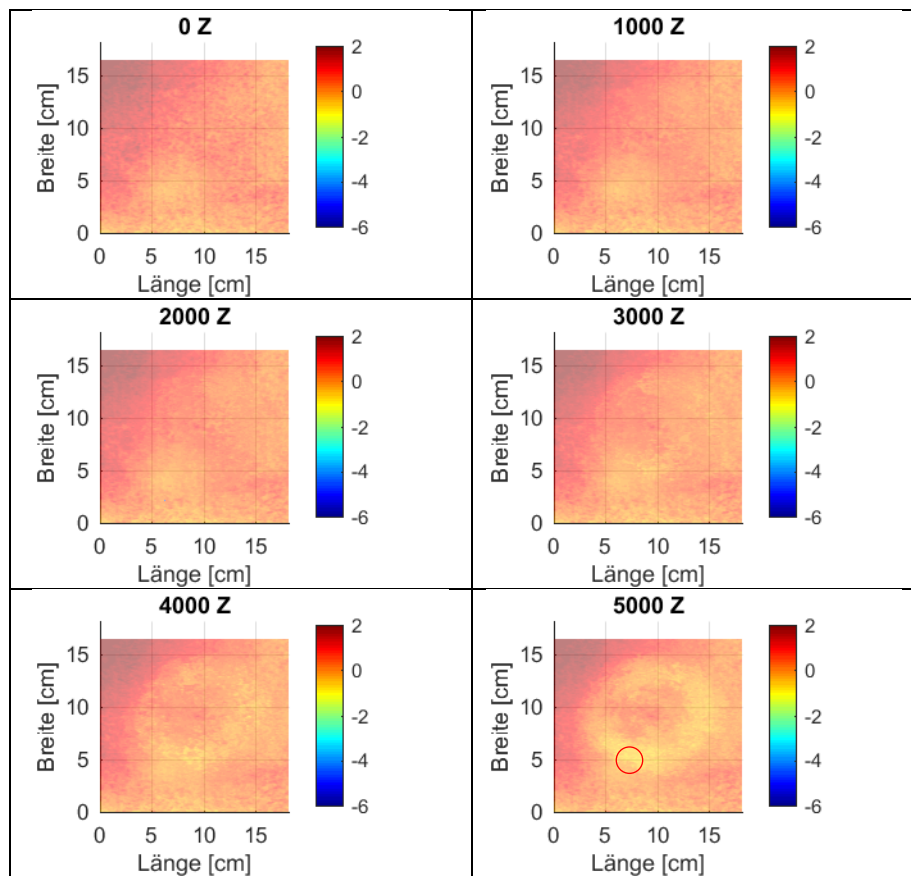
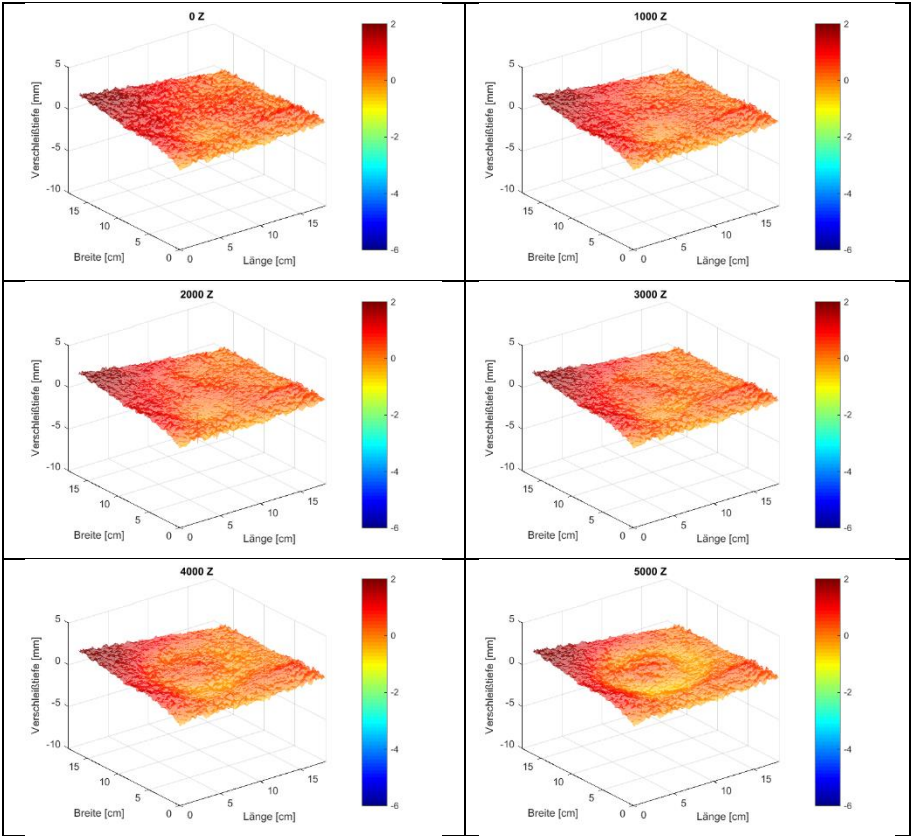


Abb. 8.110: P1\_mit Splitt: Volumenabtrag

Tab. 8.106: P2\_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht

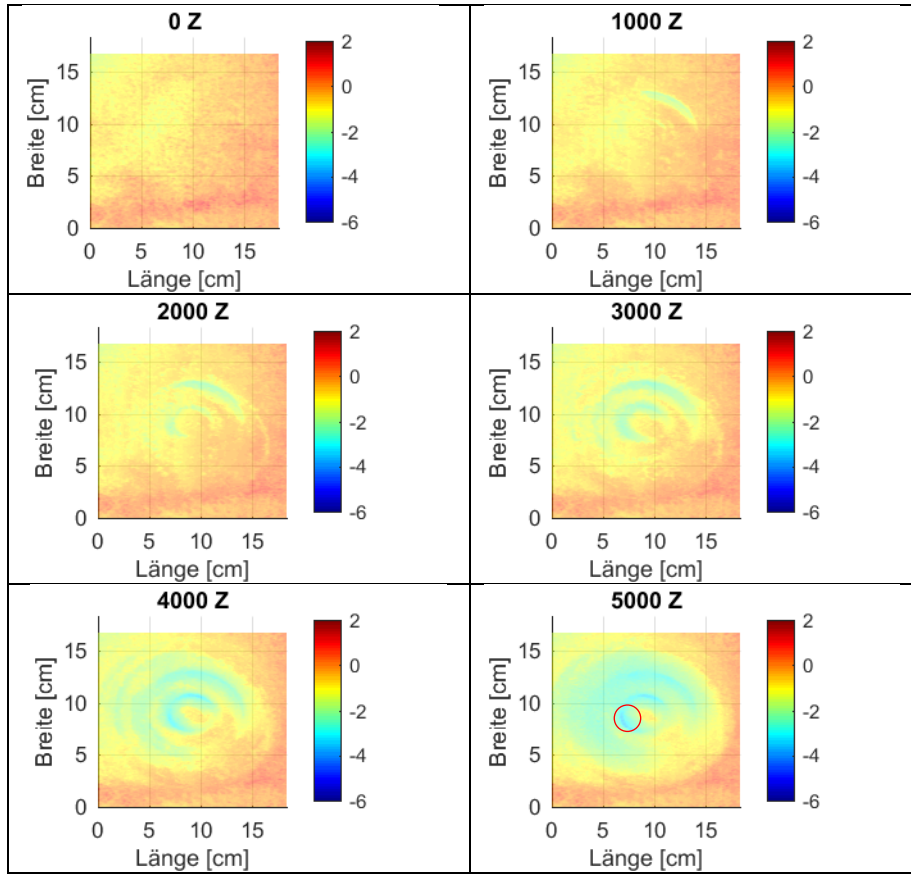


Tab. 8.107: P2\_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht

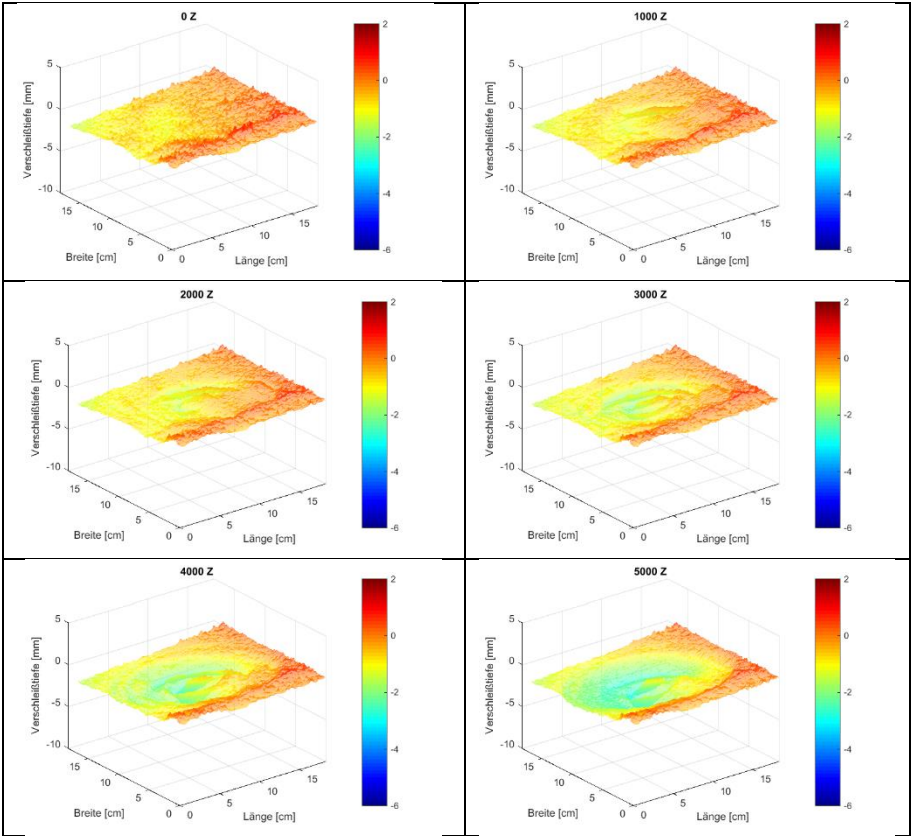





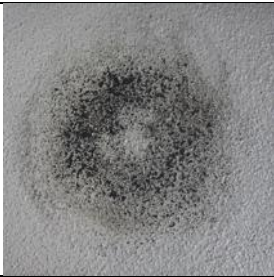
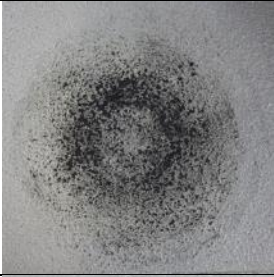
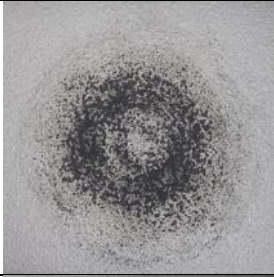
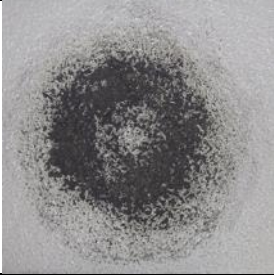

Tab. 8.108: P2\_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht




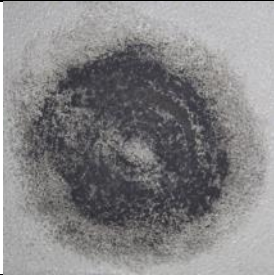
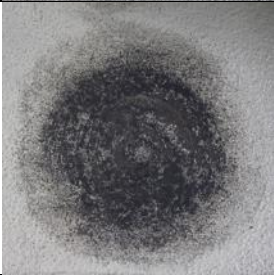

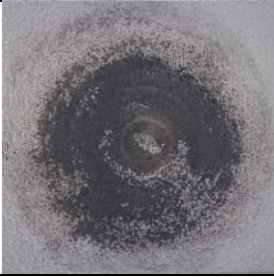
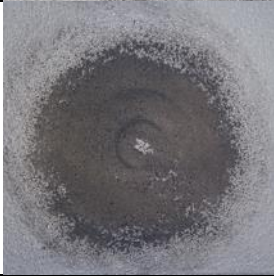
Tab. 8.109: P2\_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.110: P2\_ohne Splitt: Fotografische Auswertung

0 Z				1.000 Z
2.000 Z				3.000 Z
4.000 Z				5.000 Z

Tab. 8.111: P2\_mit Splitt: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z

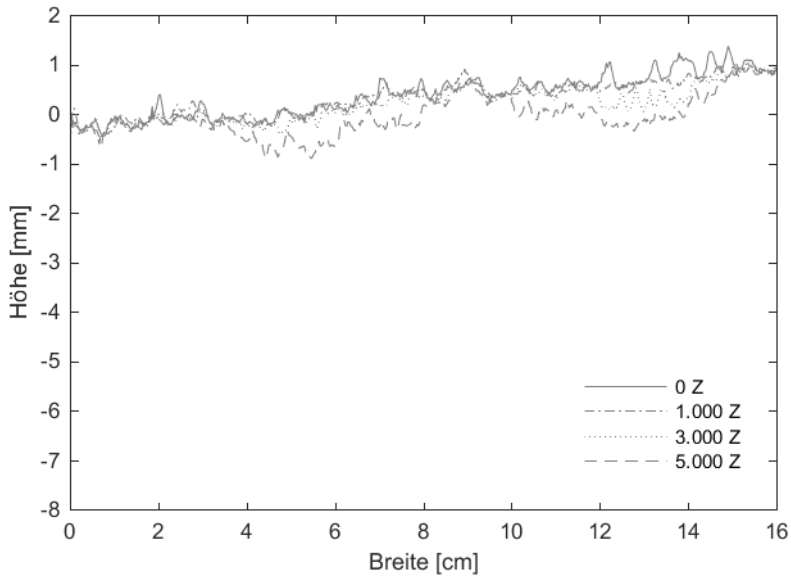


Abb. 8.111: P2\_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

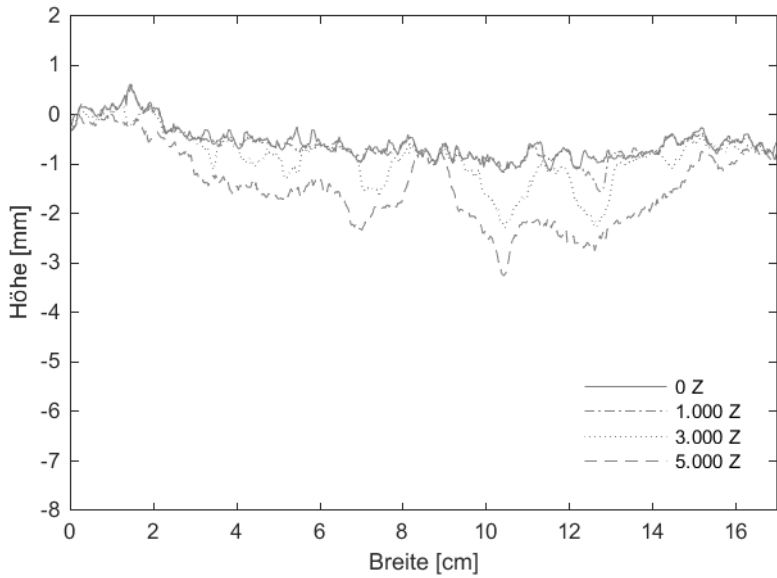


Abb. 8.112: P2\_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

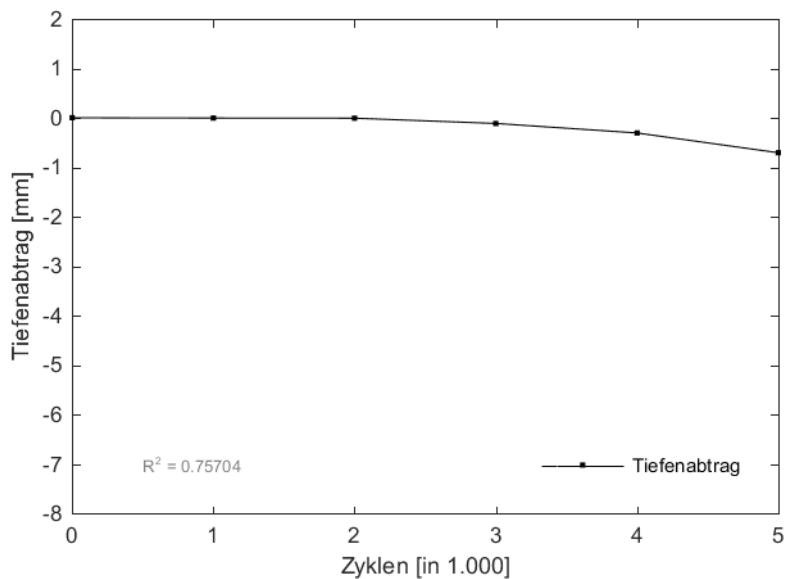


Abb. 8.113: P2\_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe

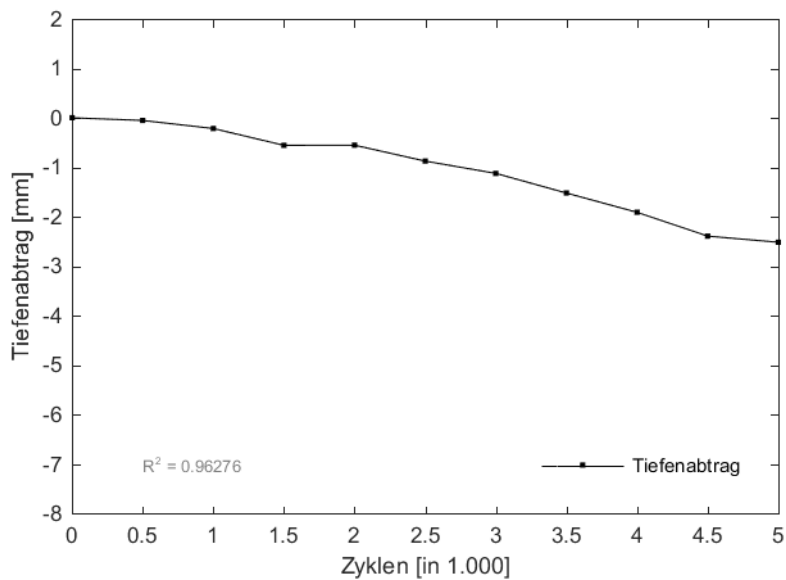


Abb. 8.114: P2\_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe

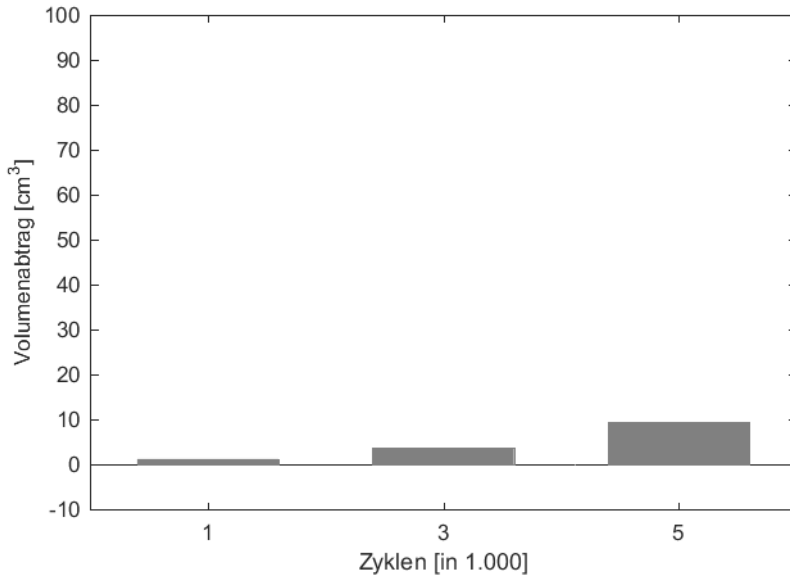


Abb. 8.115: P2\_ohne Splitt: Volumenabtrag

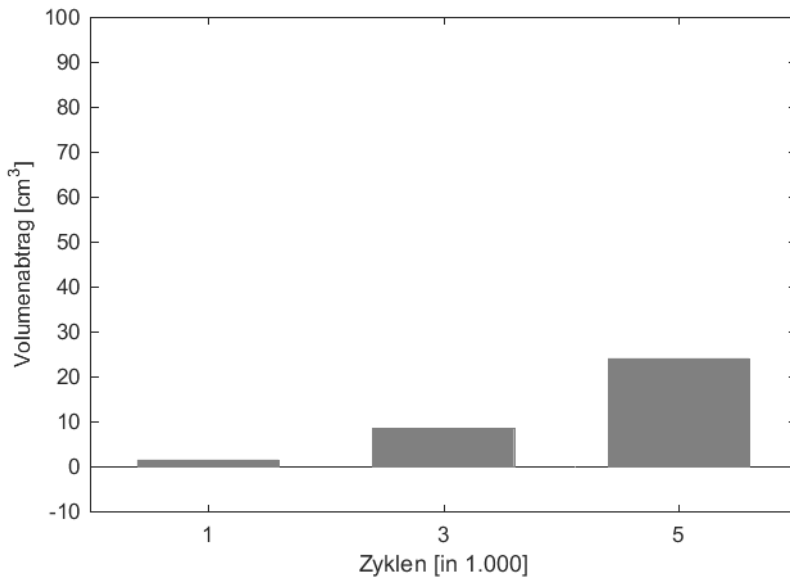
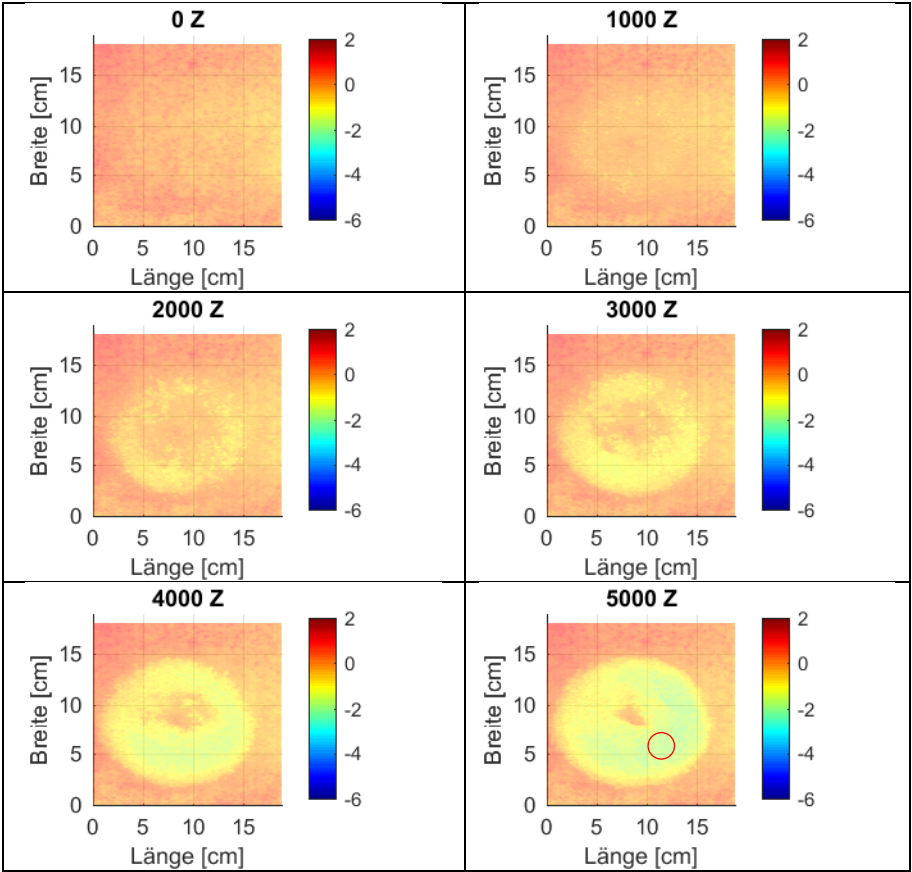


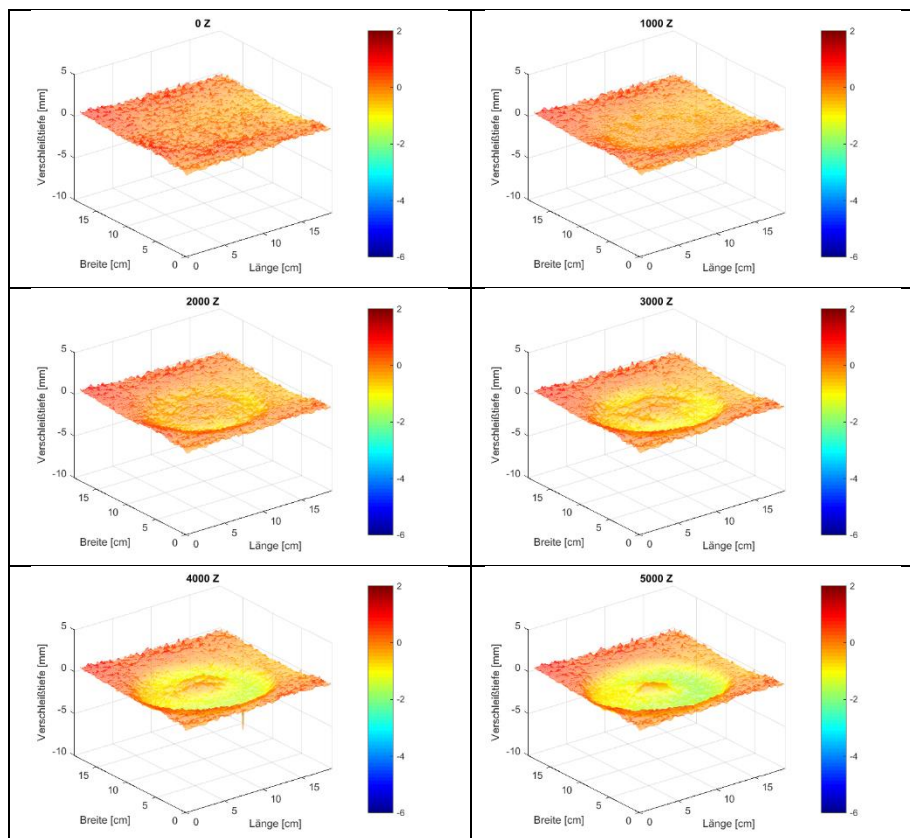
Abb. 8.116: P2\_mit Splitt: Volumenabtrag

Tab. 8.112: P3\_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht

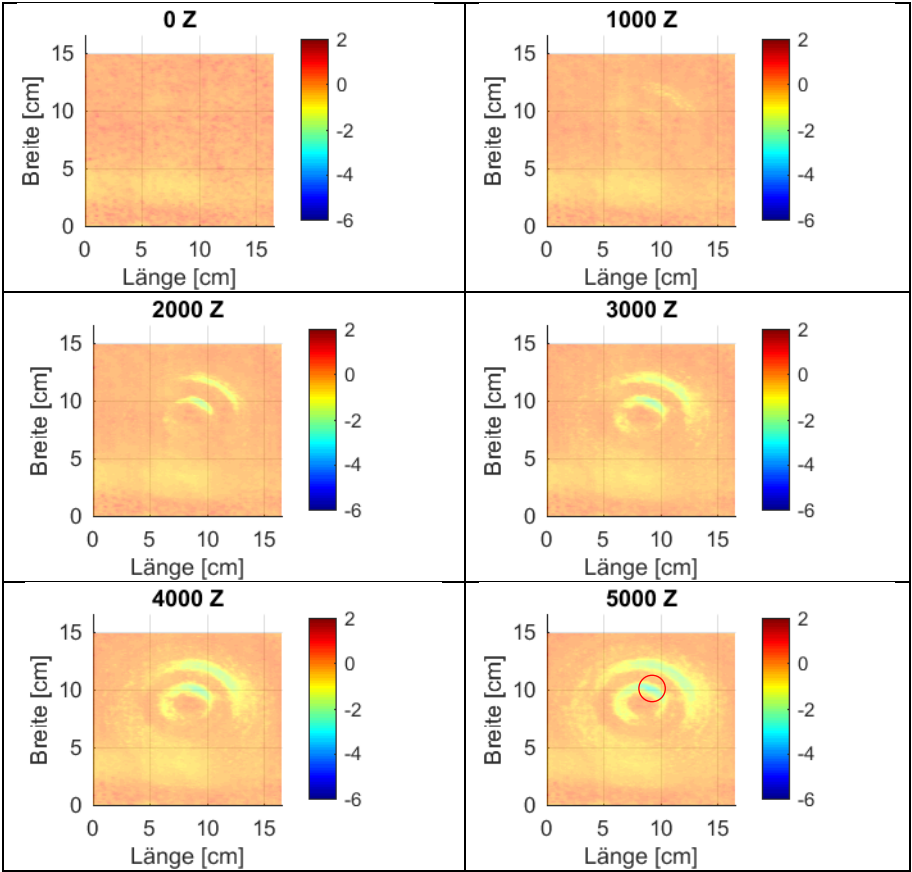




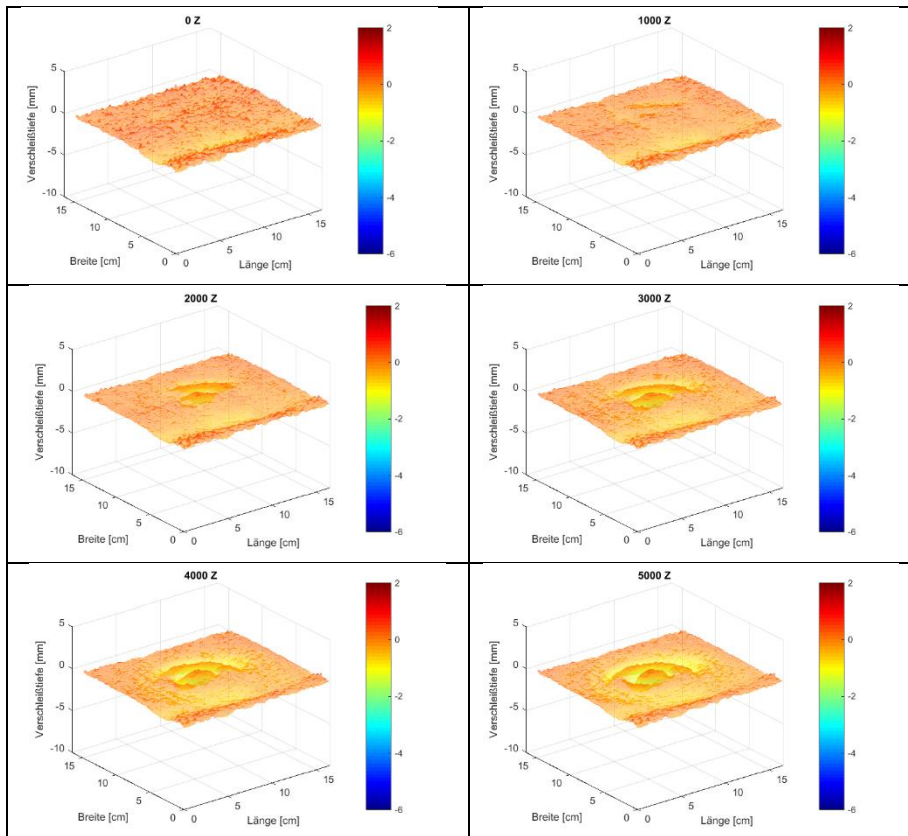
Tab. 8.113: P3\_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht









Tab. 8.114: P3\_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht






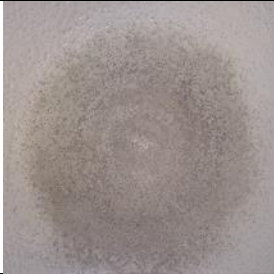


Tab. 8.115: P3\_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.116: P3\_ohne Splitt: Fotografische Auswertung

0 Z					1.000 Z
2.000 Z					3.000 Z
4.000 Z					5.000 Z

Tab. 8.117: P3\_mit Splitt: Fotografische Auswertung

0 Z						1.000 Z
2.000 Z						3.000 Z
4.000 Z						5.000 Z

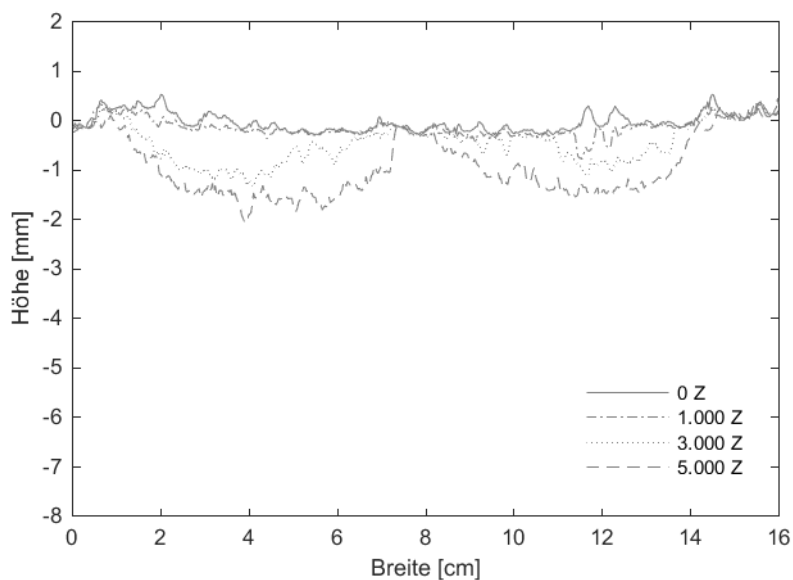


Abb. 8.117: P3\_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

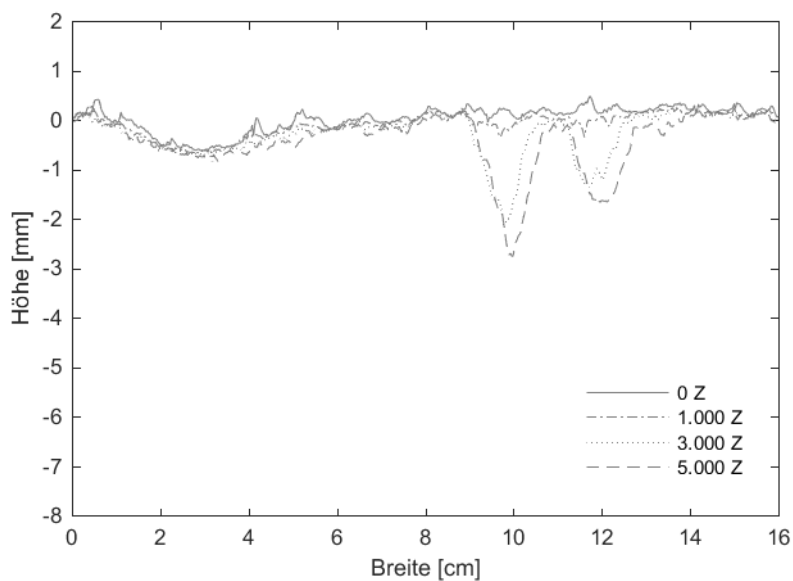


Abb. 8.118: P2\_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

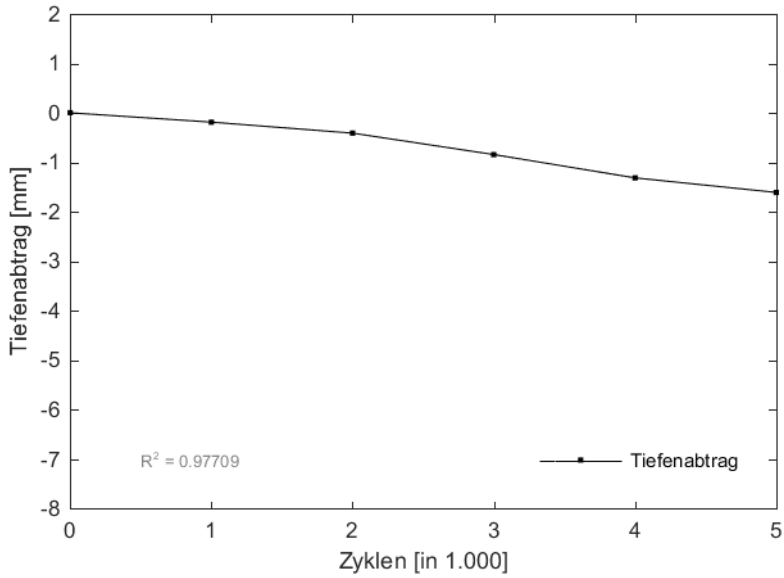


Abb. 8.119: P3\_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe

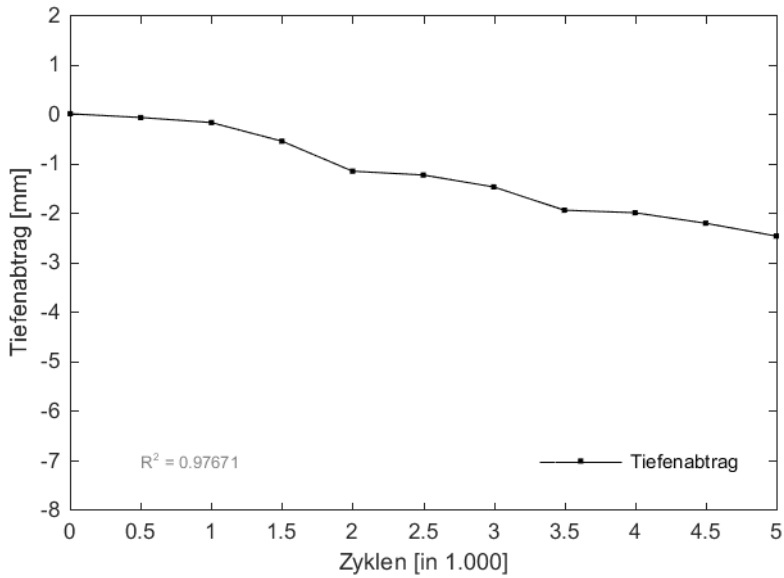


Abb. 8.120: P3\_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe

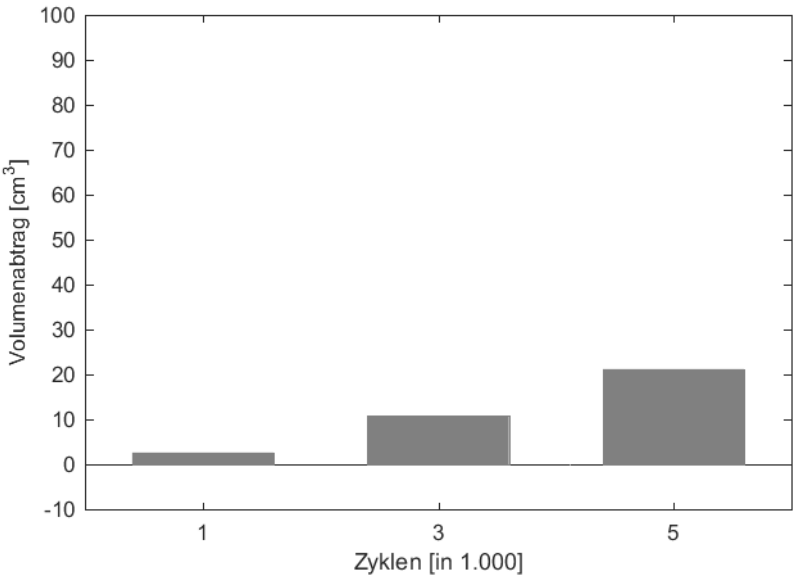


Abb. 8.121: P3\_ohne Splitt: Volumenabtrag

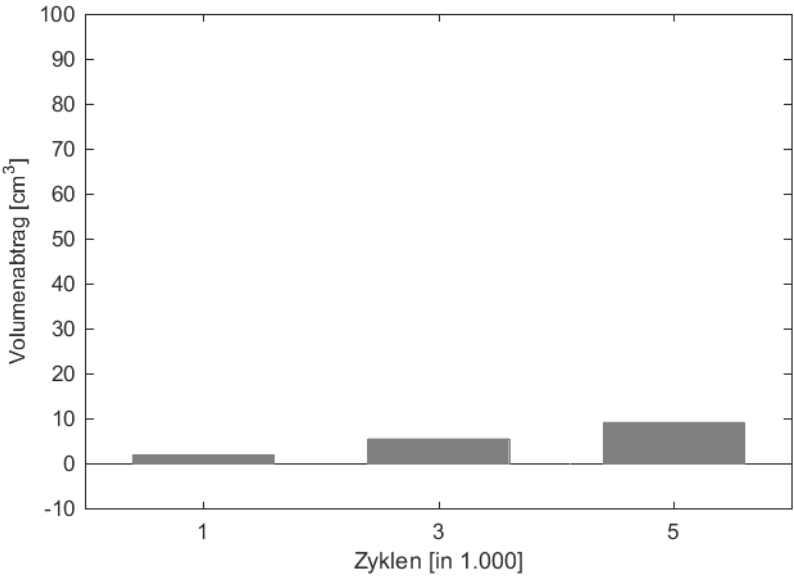
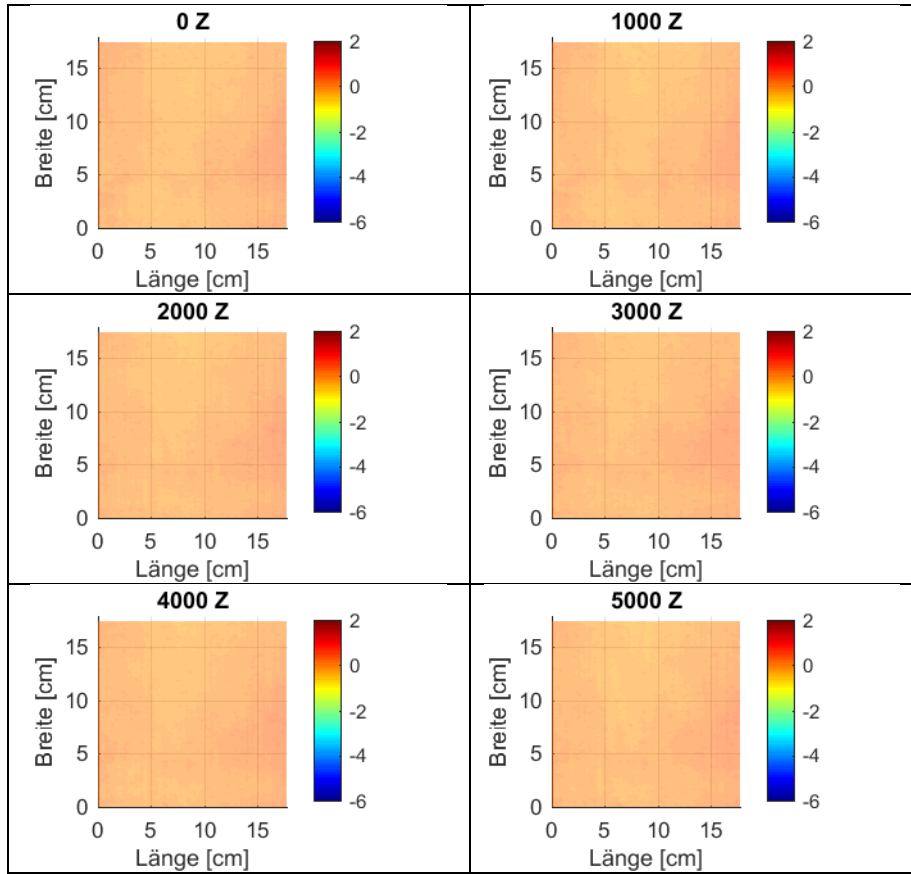


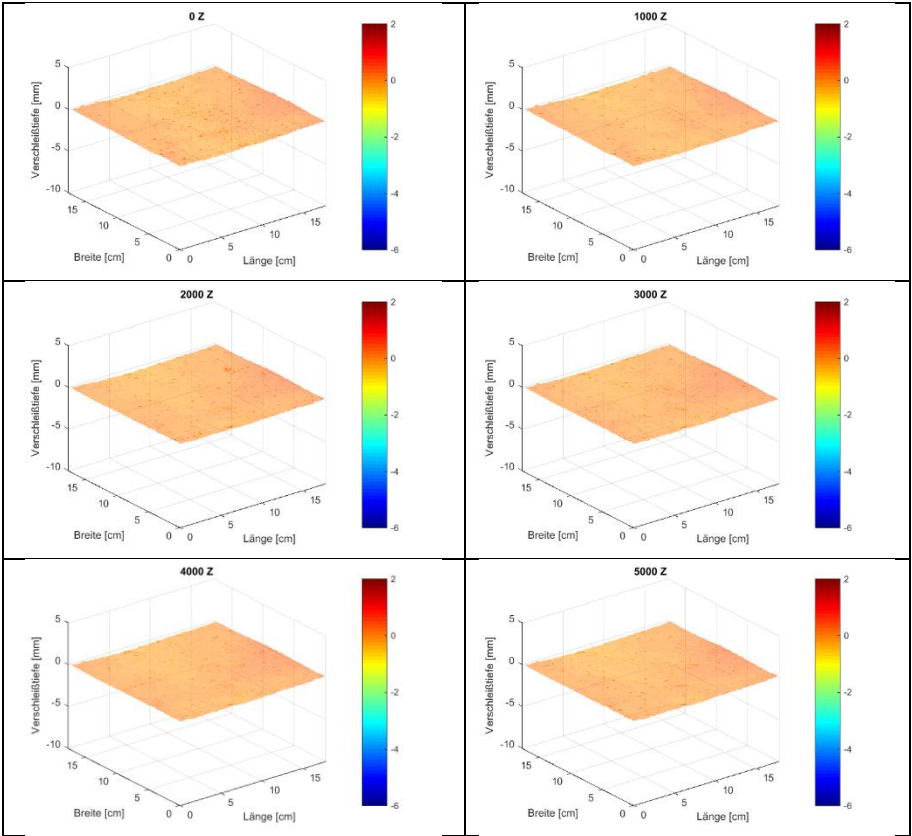
Abb. 8.122: P3\_mit Splitt: Volumenabtrag



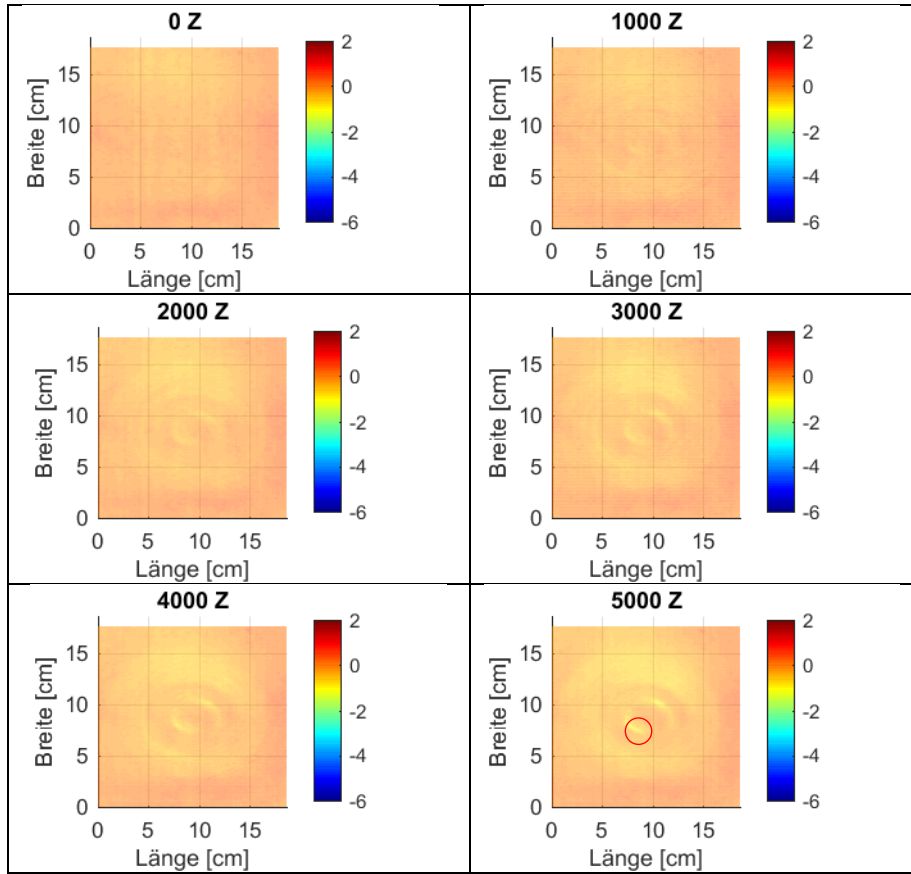
Tab. 8.118: P4\_ohne Splitt: Laserauswertung Draufsicht



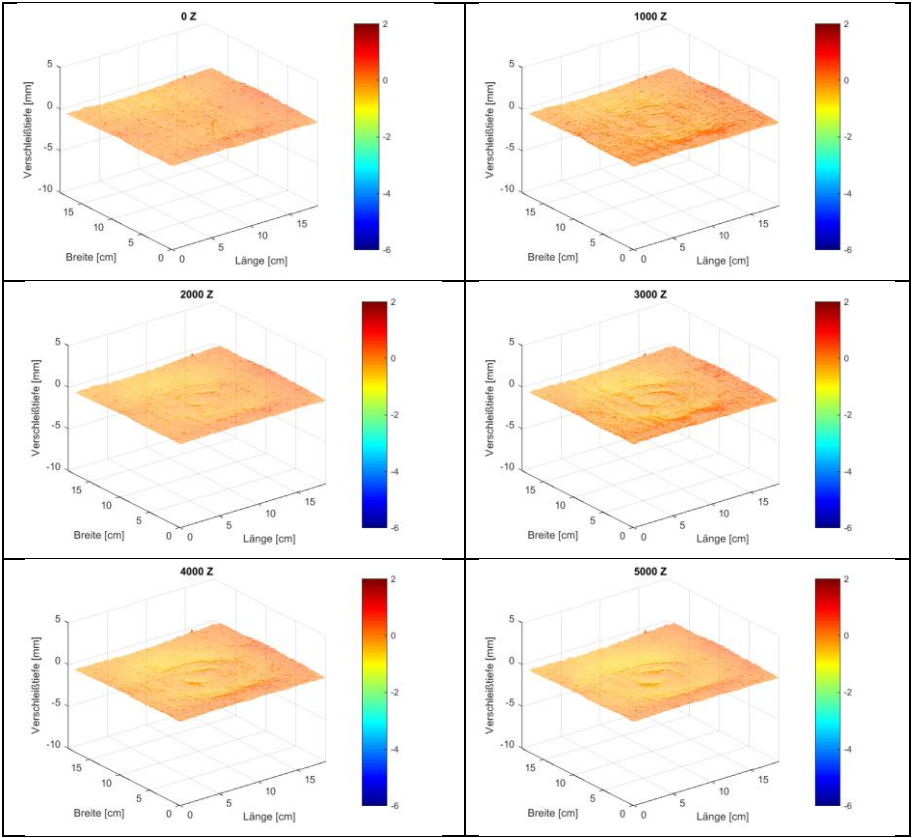
Tab. 8.119: P4\_ohne Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht



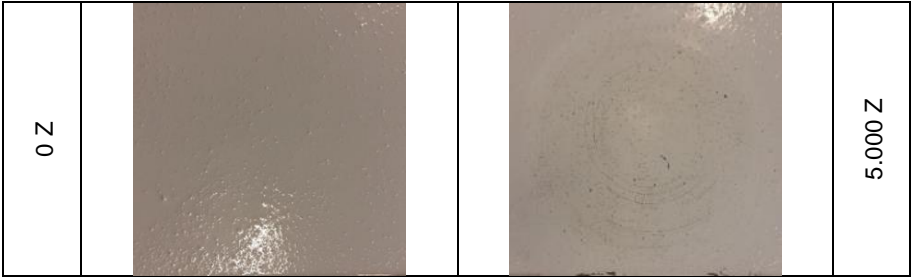
Tab. 8.120: P4\_mit Splitt: Laserauswertung Draufsicht



Tab. 8.121: P4\_mit Splitt: Laserauswertung 3D-Ansicht



Tab. 8.122: P4\_ohne Splitt: Fotografische Auswertung



Tab. 8.123: P4\_mit Splitt: Fotografische Auswertung

0 Z							1.000 Z
2.000 Z							3.000 Z
4.000 Z							5.000 Z

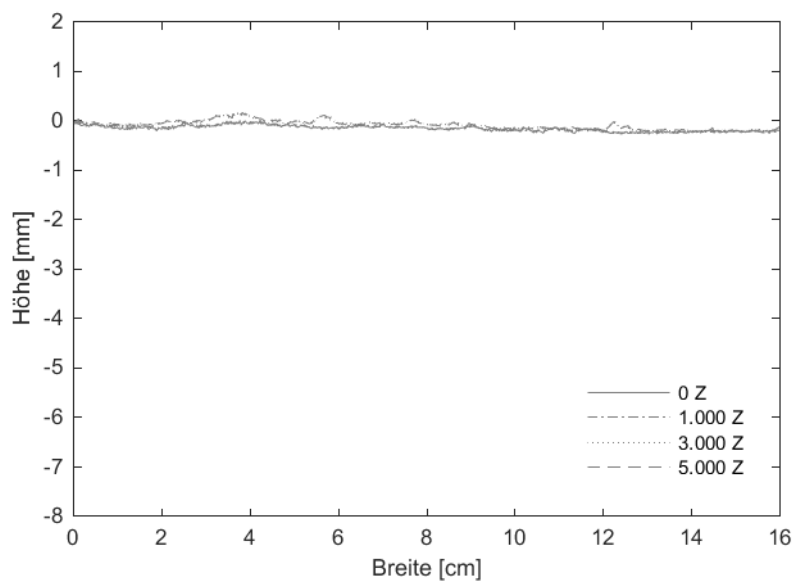


Abb. 8.123: P4\_ohne Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

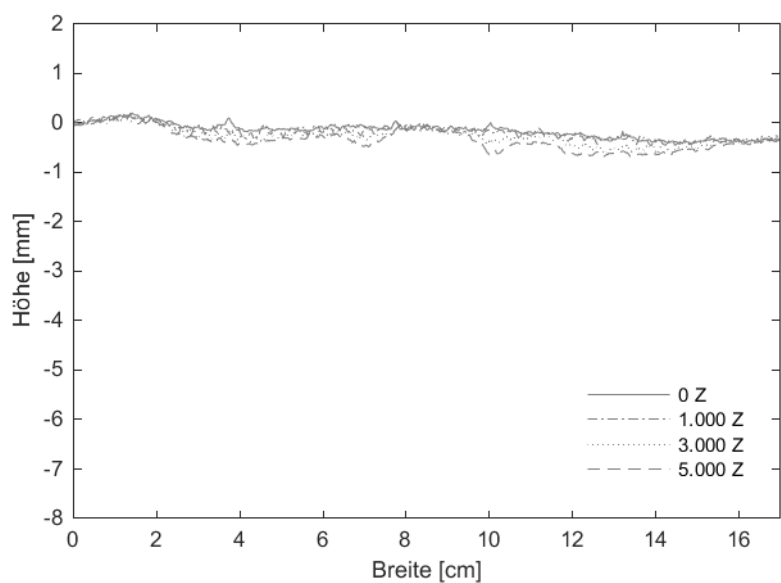


Abb. 8.124: P4\_mit Splitt: Querschnitt in Plattenmitte

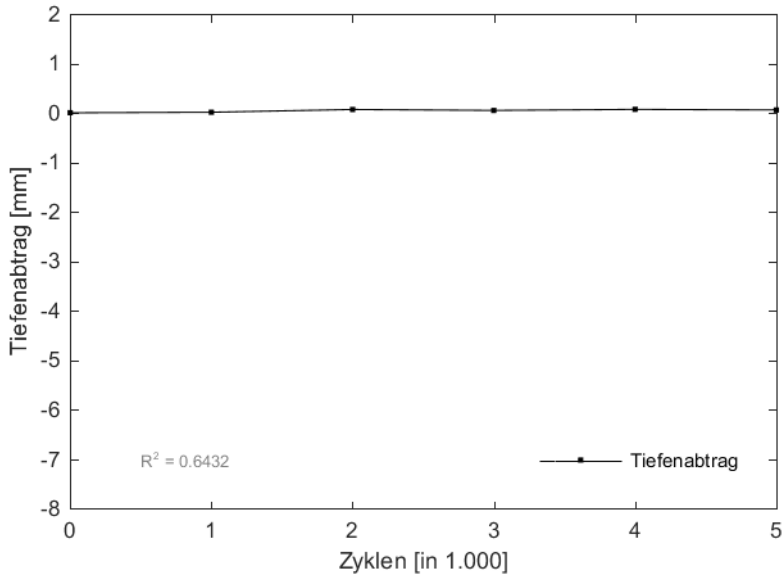


Abb. 8.125: P4\_ohne Splitt: Maximale Verschleißtiefe

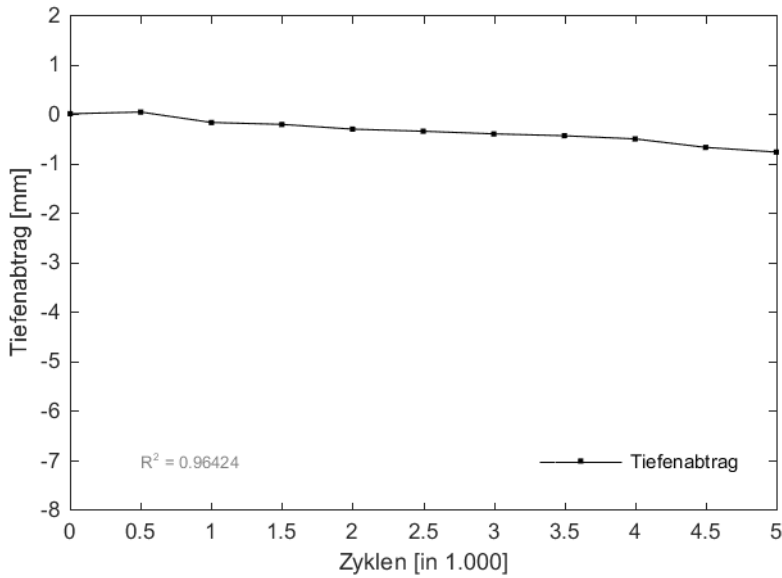


Abb. 8.126: P4\_mit Splitt: Maximale Verschleißtiefe

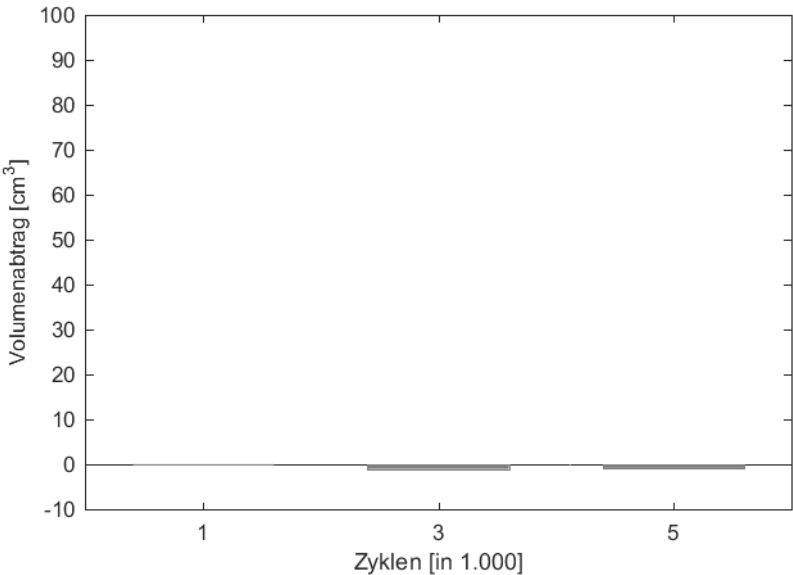


Abb. 8.127: P4\_ohne Splitt: Volumenabtrag

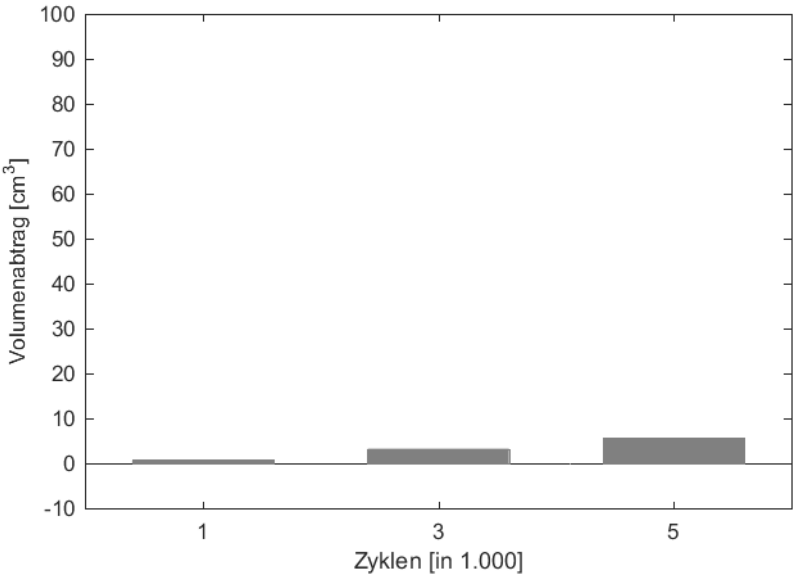


Abb. 8.128: P4\_mit Splitt: Volumenabtrag



## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name: Eva-Maria Christina Ladner

Staatsangehörigkeit: deutsch

### **Beruflicher Werdegang**

Seit 03/2021 Leitung Marketing Engineered Refurbishment der Sika Deutschland GmbH

07/2018-02/2021 Market-Development-Managerin Watermanagement im Bereich Flooring / Refurbishment der Sika Deutschland GmbH

03/2011-12/2018 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Universität Kaiserslautern am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

### **Hochschulausbildung**

04/2006-02/2011 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Kaiserslautern, Vertiefungsfächer Massivbau und Baukonstruktion, Statik und Dynamik der Tragwerke und Baubetrieb und Bauproduktion, Abschluss als Diplom-Ingenieurin

### **Schulischer Werdegang**

1997-2006 Werner-Heisenberg-Gymnasium, Bad Dürkheim, Abitur